ATMIRE

Title	Diseño de un sistema mecatrónico para la inspección por visión artificial, enfundado y encajado robotizado de envases plásticos IML para la empresa INROPLAS
Item Type	https://purl.org/coar/resource_type/c_7a1f
Authors	Blas Maurtua, Jason;Salas Abad, Paulo Cesar
Publisher	Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)
Rights	https://purl.org/coar/access_right/c_abf2
Download date	2026-11-27 21:48:24
Item License	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Link to Item	https://hdl.handle.net/10757/691496

UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

Diseño de un sistema mecatrónico para la inspección por visión artificial, enfundado y encajado robotizado de envases plásticos IML para la empresa INROPLAS

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR(ES)

Blas Maurtua, Jason	0009-0008-7474-8253
Salas Abad, Paulo Cesar	0009-0007-9074-4001

ASESOR(ES)

Lara Quispe, Miguel Alfonso	0000-0002-9288-8478

Lima, 05 de julio de 2026

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor y apoyo incondicional, y por brindarme aliento en los momentos más críticos de este camino. A mis hermanos, quienes fueron una motivación constante y a quienes espero servir de ejemplo en el ámbito profesional. A mi enamorada, por ser un pilar fundamental en mi vida, por mantenerme enfocado en el camino correcto y por acompañarme con dedicación en cada etapa de este proceso. A su señor padre, por el generoso y desinteresado apoyo que hizo posible la realización de este trabajo de suficiencia profesional.

Paulo S.

A ti, que siempre has estado de mi lado. Aprendimos que apoyarse no siempre sale perfecto, y aun así eliges estar. Gracias por tu compañía.

Jason B.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestros padres, quienes con su amor, dedicación y esfuerzo constante sentaron las bases para que pudiéramos llegar hasta aquí. Su apoyo incondicional en cada etapa de nuestra formación, tanto en los momentos de éxito como en los de dificultad, fue el pilar más importante de este camino. Este logro es tan nuestro como de ellos.

A nuestros compañeros de universidad, con quienes compartimos no solo aulas, prácticas y largas noches de estudio, sino también risas, frustraciones y la satisfacción de ver cada esfuerzo convertido en resultado. Su compañerismo, disposición para el trabajo en equipo y el apoyo mutuo que supimos construir a lo largo de la carrera fueron fundamentales para llegar a esta etapa. Más que compañeros, encontramos en ellos amigos con quienes crecer tanto académica como personalmente.

Finalmente, extendemos nuestro más sincero agradecimiento a la empresa INROPLAS, por abrirnos las puertas de sus instalaciones y depositar su confianza en nosotros al permitirnos desarrollar este trabajo en una de sus líneas de producción. Su apertura, colaboración y disposición para atender nuestras consultas y necesidades a lo largo del proceso fueron piezas clave para la realización y el éxito de este proyecto.

RESUMEN

Este trabajo aborda el diseño de detalle y la validación virtual de un sistema mecatrónico que automatiza el final de línea de una inyectora con etiquetado en molde (In-Mold Labeling, IML) en INROPLAS. Hoy ese acondicionamiento lo hacen a mano cuatro a seis operarios por turno; como uno solo no sigue la cadencia —cuatro vasos cada dieciocho segundos—, la empresa sobredimensiona el personal, con el costo, el riesgo ergonómico y la variabilidad de calidad consiguientes. La solución integra cinco estaciones —singulación en fila única, inspección por visión artificial con doble descarte, enfundado en bolsa wicket, apilado con un asistente de inserción servo-eléctrico y encajado con un robot pórtico de tres ejes— gobernadas por un controlador lógico programable (PLC) bajo una lógica de operación continua que prioriza no detener la inyectora. El dimensionamiento del manejo del producto se sustenta en modelos de fricción, sujeción por vacío y acondicionamiento aerodinámico; la cadencia y la estabilidad del transporte se analizan con perfiles de velocidad LSPB. La validación combina cálculo analítico, elementos finitos (FEA) estático y modal, estudio del tiempo de ciclo, simulación física de la singulación y validación de la lógica de control en lazo cerrado de software (SITL). La estación crítica opera en torno a 2,95 segundos por vaso, por debajo de un objetivo de robustez de 3,6 segundos —margen deliberado bajo el takt de 4,5 segundos para absorber microparos y variaciones— y sostiene la cadencia con un único supervisor. El alcance se limita al diseño y la validación virtual.

Palabras clave: automatización de final de línea; etiquetado en molde; efecto Coanda; perfil LSPB; visión artificial; eficiencia global del equipo.

ABSTRACT

This Professional Sufficiency Work addresses the detailed design and virtual validation of a mechatronic system that automates the end-of-line of an In-Mold Labeling (IML) injection machine at the company INROPLAS. In the current situation, conditioning of the cups leaving this injector relies on four to six operators per shift who inspect, bag and pack them by hand. A single operator could not keep up with the injector cadence —four cups every eighteen seconds at minimum, depending on the mold—, so the company overstaffs the line to keep the end-of-line from slowing production; the cost of this staffing, together with the ergonomic risk and the quality variability of manual work, motivates the automation. The proposed solution integrates five stations: reception and single-file singulation of the cups, machine-vision inspection with dual rejection, bagging into wicket bags, stacking by a servo-electric insertion assistant, and case-packing by a three-axis gantry robot; the system is governed by a programmable logic controller (PLC) under a continuous-operation logic aimed at overall equipment effectiveness (OEE). Sizing relies on the kinematic and dynamic analysis of the manipulator through linear-segment-with-parabolic-blends (LSPB) velocity profiles, and on friction, vacuum-suction and aerodynamic-conditioning models for handling the product and the bag. Validation is carried out through analytical calculation, static and modal finite element analysis (FEA), cycle-time study, a physical simulation of the singulation and closed-loop software (SITL) validation of the control logic. The performance target, derived from an 80 % OEE goal, is a critical-station cycle no greater than 3.6 seconds; the analysis yields an obtained result close to 2.95 seconds, below that target and below the 4.5-second takt, enough to sustain the injector cadence with a single supervisor. The scope is limited to design and virtual validation; physical manufacturing and commissioning are excluded.

Keywords: end-of-line automation; In-Mold Labeling; Coanda effect; LSPB profile; machine vision; overall equipment effectiveness.

Trabajo_u201913947.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

3%	3%	3%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	www.mdpi.com Fuente de Internet	1%
2	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1%
3	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC Trabajo del estudiante	<1%
4	Submitted to Erasmus University of Rotterdam Trabajo del estudiante	<1%
5	bip.pm.szczecin.pl Fuente de Internet	<1%
6	recibe.cucei.udg.mx Fuente de Internet	<1%
7	Submitted to BB9.1 PROD Trabajo del estudiante	<1%
8	btp.vgtu.lt Fuente de Internet	<1%
9	komorabih.ba Fuente de Internet	<1%
10	core.ac.uk Fuente de Internet	<1%
11	www.frontiersin.org Fuente de Internet	<1%
12	Submitted to University of Waikato Trabajo del estudiante	<1%
13	sol.sbc.org.br Fuente de Internet	<1%
14	www.granthaalayahpublication.org Fuente de Internet	<1%
15	www.springerprofessional.de Fuente de Internet	<1%

Tabla de contenido

RESUMEN III

ABSTRACT IV

Capítulo 1: Definición del Proyecto 11

1.1 Antecedentes 11

1.2 Descripción de la Organización 12

1.3 Definición del Problema 13

1.3.1 Problema Central 13

1.3.2 Causas 13

1.3.3 Consecuencias 13

1.4 Objetivos 14

1.4.1 Objetivo General 14

1.4.2 Objetivos Específicos 14

1.5 Planificación del Proyecto 15

1.5.1 Alcance del Proyecto 15

1.5.2 Cronograma de Actividades 15

Capítulo 2: Marco Teórico 16

2.1 Marco Conceptual 17

2.1.1 Cinemática y Dinámica de Manipulación Cartesiana 17

2.1.2 Estática y Fricción en Contactos Cónicos 17

2.1.3 Mecánica de Fluidos: Succión por Vacío 18

2.1.4 Visión Artificial: Detección de Bordes y Correlación 19

2.1.4.1 Umbralización Adaptativa Canny 20

2.1.4.2 Momentos Invariantes de Hu para Clasificación del Posicionamiento de Etiqueta 22

2.1.4.3 Principios del Sistema Neumático de Descarte Selectivo 24

2.1.4.4 Arquitectura de Hardware de Adquisición de Imagen 24

2.1.4.5 Presupuesto de Tiempos del Flujo PDI 27
2.1.5 Arquitectura de Validación Virtual (Simulación en Lazo Cerrado de Software) 28
2.1.6 Aerodinámica de Sustratos Flexibles: Chorro de Aire Radial 29
2.1.7 Singulación de un Flujo Discreto de Baja Tasa 31
2.2 Estándares, Frameworks y Buenas Prácticas 32
2.2.1 Metodología OEE 32
2.2.2 Framework Poka-Yoke 32
2.2.3 Abstracción Lógica en la Simulación Virtual 32
2.3 Marco Normativo 32
2.3.1 Estándar de Control IEC 61131-3 32
2.3.2 Seguridad de Maquinaria ISO 12100 33
2.3.3 Energía Neumática ISO 4414 y Prevención de Arranque Inesperado 33
2.3.4 Seguridad Funcional del Control ISO 13849-1 33
Capítulo 3: Desarrollo del Proyecto 35
3.1 Diseño de la Solución 35
3.1.1 Parámetros y Especificaciones de Diseño 36
3.1.2 Arquitectura General del Sistema 38
3.1.3 Diseño Mecánico y Neumático 38
3.1.4 Validación de la Singulación por Simulación 44
3.1.5 Simulación de Esfuerzos Mecánicos (FEA) 46
3.1.6 Sistema de Visión Artificial 49
3.1.7 Arquitectura de Control y Seguridad 58
3.1.8 Validación Cinemática y Estudio de Tiempos 59
3.1.9 Diagrama de Bloques de Flujo del Proceso 63
3.2 Resultados Esperados y Obtenidos 64
3.2.1 Análisis del Impacto Económico 64

3.2.2 Comparación de Eficiencia frente a la Operación Actual 68
3.2.3 Indicadores de Desempeño 70
3.3 Plan de Mantenimiento Preventivo 72
Capítulo 4: Conclusiones y Recomendaciones 78
4.1 Conclusiones 78
4.2 Recomendaciones 79
Capítulo 5: Referencias 81
Normas técnicas 84
Anexos 84
Anexo A — Lista de componentes (BOM) 86
Anexo B — Diagramas de control 89
Anexo C — Programa de control (diagrama de contactos) 92
Anexo D — Mapa de señales de entrada y salida 135
Anexo E — Planos de fabricación 137
Anexo F — Planos eléctricos 142
Anexo G — Supuestos y fuentes del análisis económico 143
Anexo H — Validación de la lógica de control (SITL) 144
Anexo I — Resultados de la simulación por elementos finitos (SolidWorks 2025) 152

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Cronograma de actividades del proyecto.

Tabla 2.1. Los siete momentos invariantes de Hu y su rol en la clasificación de la etiqueta IML.

Tabla 3.1. Parámetros geométricos y recetas de apilado por formato.

Tabla 3.2. Caja de embalaje y su capacidad.

Tabla 3.3. Materiales asignados por grupo de piezas.

Tabla 3.4. Resultados de la simulación por elementos finitos.

Tabla 3.5. Parámetros de diseño de la estación de inspección (cinco cámaras).

Tabla 3.6. Especificaciones técnicas comparadas de cámaras candidatas.

Tabla 3.7. Matriz de decisión ponderada para la selección de la cámara industrial.

Tabla 3.8. Comparativa de materiales para la cuña del cilindro de descarte.

Tabla 3.9. Tabla de verdad del sistema de clasificación PDI.

Tabla 3.10. Mapa de registros Modbus TCP del módulo de visión artificial.

Tabla 3.11. Comparativa entre la cámara de prueba y la cámara industrial de implementación.

Tabla 3.12. Resultados indicativos de la prueba de concepto con cámara convencional.

Tabla 3.13. Tiempo por vaso de cada estación frente a la estación crítica.

Tabla 3.14. Tiempos referenciales de las tareas manuales por vaso.

Tabla 3.15. Presupuesto de inversión referencial (CAPEX) por rubros, en soles.

Tabla 3.16. Evaluación del retorno de la inversión, en soles.

Tabla 3.17. Comparación de eficiencia: operación manual actual frente al sistema automatizado propuesto.

Tabla 3.18. Matriz de trazabilidad: del objetivo al resultado verificado.

Tabla 3.19. Plan de mantenimiento preventivo por estación y conjunto.

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1.1. Árbol de problemas.

Imagen 1.2. Árbol de objetivos.

Imagen 2.1. Pieza inyectada de PP original (a) y máscara de bordes generada por el detector de Canny (b).

Imagen 2.2. Modelo CAD del domo de iluminación difusa.

Imagen 2.3. Puesto de inspección óptica en línea.

Imagen 2.4. Diagrama de bloques del sistema de inspección integrado con el PLC.

Imagen 2.5. Piezas inyectadas representativas: conforme y defectuosa.

Imagen 2.6. Arquitectura de validación virtual en lazo cerrado de software (SITL).

Imagen 2.7. Esquema en corte del anillo soplador de efecto Coanda.

Imagen 3.1. Sistema de coordenadas adoptado para el diseño (vertical = Y).

Imagen 3.2. Vista de la simulación física de la singulación.

Imagen 3.3. Análisis modal del mástil del asistente de inserción: modo sin y con riostra.

Imagen 3.4. Validación en lazo cerrado de software del programa de control.

Imagen 3.5. Ciclograma de la estación crítica.

Imagen 3.5b. Distinción entre la cadencia (ciclo de la estación crítica, 2,95 s) y la latencia total del vaso de extremo a extremo.

Imagen 3.6. Diagrama de bloques de flujo del proceso.

Capítulo 1: Definición del Proyecto

1.1 Antecedentes

INROPLAS opera bajo un régimen de producción continua y atiende demanda tanto local como internacional. Para sostener su competitividad, sobre todo en la línea de envases decorados y de merchandising, la empresa ha incorporado tecnología de etiquetado en molde (In-Mold Labeling, IML). Esta tecnología emplea robots cartesianos de alta velocidad que insertan la etiqueta dentro del molde y extraen la pieza ya terminada, lo que reduce el tiempo de ciclo de la máquina a un mínimo de dieciocho segundos —variable según el molde— y eleva la producción a un orden de seis a siete mil unidades por turno según su duración.

A partir de las visitas técnicas y del diagnóstico de la planta, se identificó que, si bien la extracción de la pieza ya está automatizada, el manejo del producto en el final de línea —la etapa posterior a la inyección— sigue siendo una operación manual sin integración tecnológica. Tras ser depositados por el robot IML sobre la faja transportadora, los vasos se procesan en condiciones poco eficientes: la inspección de la etiqueta y de las rebabas obliga al operario a tomar cada vaso y girarlo para observarlo por completo, lo que ocupa su atención y ambas manos; el embolsado en empaques flexibles de polietileno se hace a mano, y la rigidez baja de la bolsa, junto con la electricidad estática, dificulta abrirla con rapidez; y, en conjunto, la ejecución manual no logra igualar el ritmo con que la inyectora expulsa el producto.

La planta opera varias inyectoras, pero solo una emplea la tecnología IML; las demás producen piezas más sencillas y su final de línea lo atienden uno o dos operarios sin dificultad. Es el final de línea de la inyectora IML el que concentra una alta demanda de personal. Como un solo operario no podría seguir el ritmo de la inyectora, la empresa asigna entre cuatro y seis operarios por turno a esa máquina para que el final de línea no frene la producción. Por ello, más que un cuello de botella en sentido estricto, el problema es el sobredimensionamiento del personal y sus consecuencias: el costo de la dotación, el riesgo en seguridad y salud en el trabajo —por la repetición sostenida de tareas a máxima velocidad expone a los operarios a sobrecarga ergonómica— y la variabilidad de calidad asociada a la fatiga visual. De este diagnóstico surge la necesidad de automatizar el final de línea de la

inyectora IML, de modo que la inspección, el embolsado y el encajado se realicen de forma sincronizada con ella.

1.2 Descripción de la Organización

INROPLAS es una empresa manufacturera orientada a la producción en serie mediante moldeo por inyección. Su modelo de negocio se organiza en dos líneas principales. La primera es el servicio de maquila, dedicado a inyectar productos industriales y comerciales para terceros, como jabas agrícolas, envases para la industria alimentaria y componentes plásticos de exigencia elevada. La segunda es la línea de merchandising y educativa, bajo marca propia, que abarca componentes educativos, juegos didácticos y envases publicitarios decorados; para estos últimos, la empresa cuenta con celdas de inyección equipadas con sistemas robóticos IML que automatizan el etiquetado y la extracción de las piezas.

La planta está dispuesta para asegurar la transición del material desde la resina peletizada hasta el producto terminado. El núcleo productivo es el área de inyección, que concentra la mayor inversión tecnológica y reúne las máquinas inyectoras según las exigencias geométricas de cada producto. Alrededor de este núcleo operan áreas de soporte: el área de mezcla, encargada de dosificar y homogeneizar la resina virgen con pigmentos o masterbatch; la zona de matricería y mantenimiento, donde se resguardan y ajustan los moldes; la zona de molinos, destinada a triturar el producto defectuoso; y la zona de empaque y final de línea, ubicada junto a la descarga de las inyectoras. Dentro de esta última, el presente trabajo se enfoca específicamente en el final de línea de la inyectora IML, que es el que concentra la mayor demanda de personal.[1]

En cuanto a su dirección estratégica, la organización define como misión simplificar la venta y la distribución de sus productos para que lleguen de forma eficiente a sus clientes, y como visión construir relaciones sólidas con ellos, impulsar las ventas y asegurar una distribución eficiente. La articulación de estas áreas bajo producción continua exige una sincronización constante entre la tecnología de inyección y los procesos logísticos de salida.

[1] La descripción de la organización se limita a los aspectos pertinentes para el alcance de este trabajo; la empresa cuenta con otras áreas, líneas de producción y proyectos que exceden el alcance del presente informe.

1.3 Definición del Problema

El final de línea de la inyectora IML se analiza con la metodología del árbol de problemas, que ordena el problema central, sus causas y sus consecuencias en torno a un efecto de fondo: la baja rentabilidad y la escalabilidad limitada de la línea (Imagen 1.1).

1.3.1 Problema Central

Alta dependencia de mano de obra en el final de línea de la inyectora IML.

1.3.2 Causas

- Desfase entre la cadencia de la inyectora y la capacidad de un operario.
- Alto contenido de trabajo manual por vaso (inspección, embolsado, apilado y encajado).
- Ejecución secuencial de las tareas que impide el paralelismo.

1.3.3 Consecuencias

- Sobredimensionamiento del personal y su elevado costo.
- Inconsistencia en la calidad final.
- Sobrecarga ergonómica y riesgo ocupacional.
- Variabilidad de la calidad dentro del lote.

Imagen 1.1 — Árbol de problemas del final de línea IML

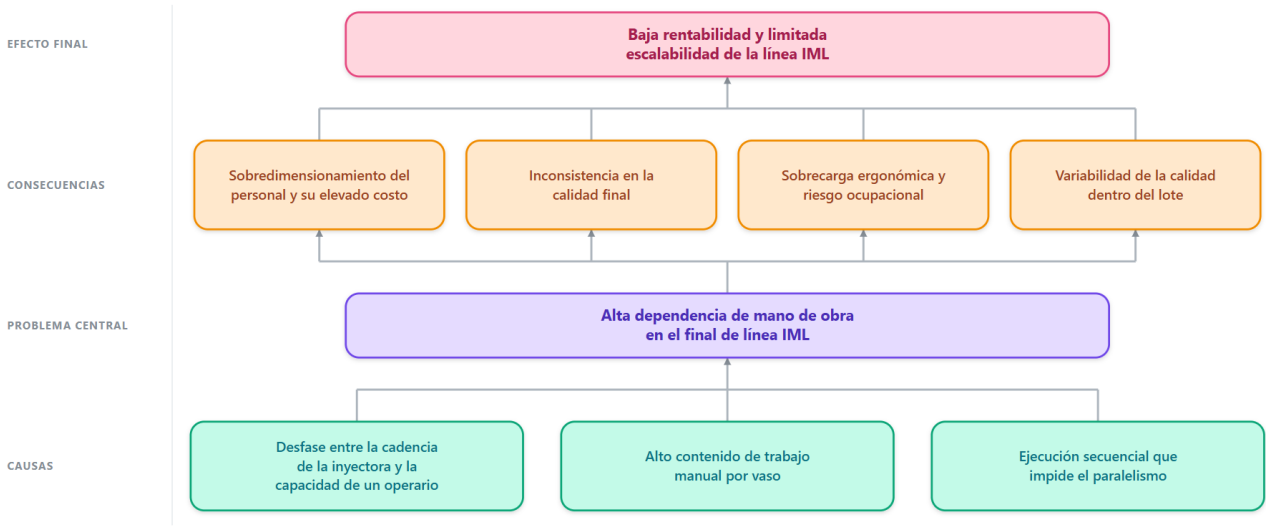


Imagen 1.1. Árbol de problemas del final de línea IML.

1.4 Objetivos

A partir del problema central y de sus ramificaciones se formula el árbol de objetivos, que convierte cada estado negativo en un logro buscado (Imagen 1.2).

1.4.1 Objetivo General

Automatizar el final de línea de la inyectora IML de INROPLAS.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Automatizar el acondicionamiento del vaso a la salida de la inyectora.
- Desarrollar un sistema de visión artificial para la inspección del producto.
- Sincronizar el empaque con el ritmo de la inyección para lograr un flujo continuo.
- Estandarizar el control de calidad y mitigar el riesgo ergonómico del trabajo manual.

Imagen 1.2 — Árbol de objetivos del final de línea IML

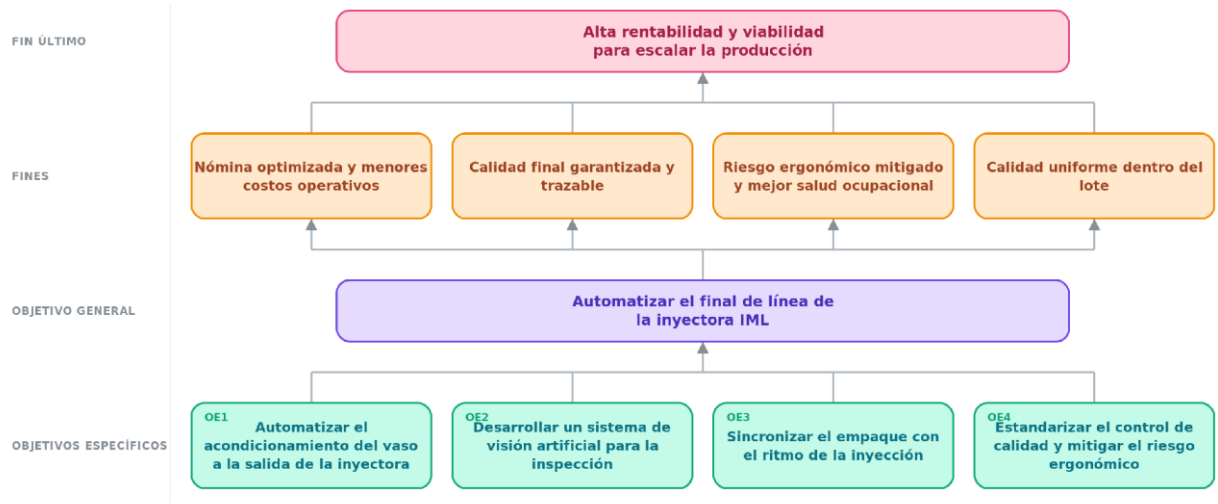


Imagen 1.2. Árbol de objetivos.

1.5 Planificación del Proyecto

1.5.1 Alcance del Proyecto

El trabajo se limita al diseño integral y a la validación virtual del sistema. Comprende el modelado mecánico tridimensional de las estaciones, la ingeniería de control —la programación de la lógica secuencial y su validación en un entorno de simulación de PLC—

, el desarrollo del sistema de visión artificial y la validación estructural del diseño mediante análisis por elementos finitos.

Se excluyen la adquisición de licencias comerciales, la compra de materiales físicos, la fabricación, el ensamblaje y la puesta en marcha real del equipo en INROPLAS. También se excluye la simulación computacional de la deformación de cuerpos blandos, como las bolsas de polietileno, cuyo comportamiento se aborda de forma analítica.

1.5.2 Cronograma de Actividades

El proyecto se organiza en fases sucesivas que abarcan desde el diagnóstico inicial hasta la validación virtual. La Tabla 1.1 detalla las actividades y sus periodos de ejecución.

Tabla 1.1. Cronograma de actividades del proyecto.

Fase	Descripción de la actividad	Periodo de ejecución
Fase 1	Gestión inicial y diagnóstico de la situación actual	Semana 1 – 4
Fase 2	Diseño mecánico tridimensional y neumático	Semana 5 – 10
Fase 3	Arquitectura de control, programación de PLC e interfaz HMI	Semana 8 – 14
Fase 4	Visión artificial e integración de señales	Semana 11 – 16
Fase 5	Validación virtual: elementos finitos, tiempo de ciclo y simulación física	Semana 14 – 18
Fase 6	Consolidación del expediente técnico y redacción del informe	Semana 17 – 20

Nota: el caso base valora al personal retirado con las cargas de ley (ahorro mayor); el caso conservador, al piso de la Remuneración Mínima Vital (ahorro menor). El beneficio neto es el ahorro anual menos el costo de operación incremental. El VAN se calcula a una tasa de descuento del 12 % en un horizonte de 10 años, y la TIR es la tasa que anula el VAN.

Capítulo 2: Marco Teórico

Este capítulo reúne las bases teóricas, matemáticas y normativas que fundamentan el diseño. A partir de principios físicos y de estándares industriales se encuentra el sustento necesario para dimensionar, controlar y validar el sistema propuesto.

Para situar los modelos que siguen, conviene describir brevemente la solución. El sistema recibe los vasos de la inyectora en grupos de cuatro y los procesa en cinco estaciones sucesivas: recepción y singulación en fila única; inspección por visión artificial con doble descarte; enfundado, donde cada vaso cae por una trampilla dentro de una bolsa de polietileno tipo wicket que se abre por succión con ventosas; apilado, donde un asistente de inserción servo-eléctrico anida el vaso sobre los anteriores para formar una torre sostenida por un elevador de indexación, mientras un anillo soplador acomoda sin contacto el sobrante de película (el faldón); y encajado, donde un robot pórtico deposita la torre en la caja. Con este contexto, las secciones siguientes presentan los principios físicos, matemáticos y normativos que fundamentan el dimensionamiento y la validación; el diseño de detalle de cada estación se desarrolla en el Capítulo 3.

2.1 Marco Conceptual

2.1.1 Cinemática y Dinámica de Manipulación Cartesiana

La manipulación en un espacio de tres ejes ortogonales se apoya en el desplazamiento de juntas prismáticas. Como los ejes son perpendiculares entre sí, el movimiento de cada uno se analiza por separado. Para lograr un transporte estable y sin vibración, cada eje sigue un perfil de velocidad con segmentos lineales y empalmes parabólicos (LSPB), que acelera de forma gradual, mantiene una velocidad de crucero y desacelera de forma gradual, según lo documentan Vorasawad et al. (2023) y Yoon (2019).

La posición a lo largo del tiempo se describe por tramos:

$$q_i(t) = \{q_0 + \frac{1}{2}\, a_{máx}\, t^2, 0 \le t \le t_a \; q_0 + v_{máx}\left(t - \frac{t_a}{2}\right), t_a < t \le t - t_d \; q_f - \frac{1}{2}\, a_{máx}\, (T-t)^2, t - t_d < t \le T \qquad (2.1)$$

donde $q_i(t)$ es la posición instantánea del eje i, en metros; q_0 y q_f son las posiciones inicial y final del tramo, en metros; $a_{máx}$ es la aceleración máxima admitida por el actuador, en

metros por segundo al cuadrado; $v_{máx}$ es la velocidad de crucero fijada para cumplir el tiempo de ciclo, en metros por segundo; t_a y t_d son los tiempos de aceleración y de desaceleración, en segundos; y T es la duración total del movimiento, en segundos.

Programar este perfil en el control permite limitar la sacudida y evitar que las torres de vasos pierdan estabilidad durante el traslado; el suavizado de los cambios de aceleración reduce la vibración residual del conjunto transportado (Fang et al., 2023).

2.1.2 Estática y Fricción en Contactos Cónicos

La sujeción de un vaso troncocónico mediante un cabezal de presión radial depende de la relación entre la fuerza que aplican las almohadillas y la fricción que se genera en el contacto. Bajo el modelo de fricción seca, la fuerza normal mínima que cada almohadilla debe ejercer para evitar el deslizamiento es:

$$F_{N,mín} = \frac{m\,(g+a_z)}{n\,(\mu\,cos\alpha+sin\alpha)} \tag{2.2}$$

donde $F_{N,mín}$ es la fuerza normal mínima por almohadilla, en newton; m es la masa total de la torre de vasos y de la bolsa, en kilogramos; g es la aceleración de la gravedad, en metros por segundo al cuadrado; a_z es la aceleración vertical impuesta por el robot durante el traslado, en metros por segundo al cuadrado; n es el número de puntos de contacto (almohadillas); μ es el coeficiente de fricción estática entre la almohadilla de poliuretano y la pared del vaso; y α es el semiángulo de conicidad del vaso, en radianes.

Esta expresión fija la presión de trabajo de los cilindros del cabezal: la fuerza debe ser suficiente para compensar las cargas de inercia del movimiento sin deformar de manera permanente el vaso de la base; el agarre de cuerpos huecos y deformables se apoya: Xu et al. (2020) proponen una métrica de calidad para el agarre de cuerpos huecos deformables, y Vitrani et al. (2023) muestran que las almohadillas elastoméricas elevan la fricción efectiva de la sujeción.

2.1.3 Mecánica de Fluidos: Succión por Vacío

La apertura de la bolsa se realiza con ventosas que sujetan sus dos caras por diferencia de presión. La fuerza de retención disponible es el producto del área efectiva de la ventosa por la diferencia entre la presión atmosférica y la presión de vacío alcanzada:

$$F_{s,disp} = A\,(P_{atm} - P_{vac}) \tag{2.3}$$

El criterio de diseño exige que esta fuerza disponible supere, con un margen de seguridad, la carga que debe sostenerse:

$$F_{s,disp} \geq S\,m\,(g + a_z) \tag{2.4}$$

donde $F_{s,disp}$ es la fuerza de retención disponible, en newton; A es el área efectiva de contacto de la ventosa, en metros cuadrados; P_{atm} es la presión atmosférica, en pascal; P_{vac} es la presión absoluta alcanzada por el generador de vacío, en pascal; S es el factor de seguridad, adimensional —típicamente igual o mayor que dos—; m es la masa a sostener, en kilogramos; g es la aceleración de la gravedad; y a_z es la aceleración vertical durante la maniobra. El margen se aplica aumentando la carga requerida, no reduciendo la fuerza disponible. Con este criterio se determinan el diámetro de las ventosas y el nivel de vacío necesario para abrir la bolsa sin fallos de alimentación; el manejo de películas flexibles mediante ventosas de fuelle acopladas a generadores de vacío está validado experimentalmente en la literatura (Yoo et al., 2023).

2.1.4 Visión Artificial: Detección de Bordes y Correlación

La visión artificial es la disciplina que dota a los sistemas automatizados de la capacidad de adquirir, procesar y analizar imágenes digitales para tomar decisiones de calidad sin intervención humana. En el contexto de la manufactura de vasos IML, la inspección manual al 100 % de la producción es inviable por las velocidades de línea involucradas y por la fatiga sensorial que genera tasas de error visual superiores al 3 % en turnos de ocho horas (Lee et al., 2021; Ha & Jeong, 2021). Los dos defectos críticos que el módulo de visión artificial debe clasificar de forma autónoma son: (1) rebaba, exceso de material en el borde del vaso generado por desgaste del molde , cuantificable como una desviación radial ΔR superior al límite de especificación del molde; y (2) descentrado de la etiqueta IML, detectable mediante la diferencia de momentos invariantes de Hu entre la posición real de la etiqueta y la imagen de referencia almacenada en el sistema. El flujo de procesamiento digital de imágenes (PDI) implementado integra operadores de gradiente de Sobel, detección de bordes de Canny con umbralización adaptativa dinámica y comunicación Modbus TCP hacia el PLC Siemens S7, conforme se desarrolla en las subsecciones siguientes. El diseño

de la estación, la selección de componentes y los parámetros calibrados se presentan en el Capítulo 3.

La detección de bordes que fundamenta la identificación de la rebaba se apoya en la teoría de Canny (1986), quien demostró que un detector óptimo debe cumplir tres criterios: baja tasa de error de detección, localización precisa del punto del borde y respuesta única por borde. La respuesta óptima al perfil de borde ideal modelado como función escalón se obtiene mediante la primera derivada de una función gaussiana. El operador resultante se implementa mediante los kernels de Sobel en las direcciones horizontal y vertical, cuya combinación entrega la magnitud y la dirección del gradiente:

$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}\ ; \qquad \theta = arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \qquad (2.5)$$

Nomenclatura:

- G_y, G_x: Derivadas parciales de la intensidad de la imagen (operadores de Sobel).
- $|G|$: Magnitud de la variación de intensidad (detecta el borde).
- θ: Dirección del gradiente de la imagen $[rad]$.

2.1.4.1 Umbralización Adaptativa Canny

La implementación estándar del algoritmo de Canny emplea umbrales fijos globales T_{high} y T_{low}, que son óptimos únicamente cuando la iluminación y el contraste del objeto son constantes. En entornos productivos reales, tres fuentes de variabilidad afectan la distribución del gradiente entre sesiones: (1) la fluctuación de temperatura de color de los LEDs del domo durante el turno; (2) la variación de reflectancia entre los diferentes colores de etiqueta de la familia de productos; y (3) el envejecimiento progresivo del revestimiento difusor. Lee et al. (2021) cuantificaron que la umbralización estadística basada en el contraste local de la imagen mejora la precisión de detección de defectos de moldeo en un 23 % frente a umbrales globales fijos. Liu et al. (2024) extendieron este principio con un operador de Canny mejorado de escala adaptativa, confirmando la superioridad del enfoque estadístico en inspección industrial en línea.

La solución adoptada es la umbralización dinámica basada en la estadística del gradiente de cada imagen, ejecutada en cuatro pasos.

Paso 1: calcula la magnitud del gradiente G dentro de la región de interés (ROI) anular del vaso:

$$G(x,y) = \sqrt{I_x(x,y)^2} \tag{2.6}$$

Paso 2: calcula la media y la desviación estándar del gradiente sobre la ROI:

$$\mu_G = \frac{1}{N} \cdot \sum \quad G \;\; ; \;\; \sigma_G = \sqrt{\frac{1}{N}} \tag{2.7}$$

donde μ_G es la media del gradiente sobre la región de interés, en niveles de gris; σ_G es la desviación estándar del gradiente en los mismos niveles; y N es el número total de píxeles de la ROI.

Paso 3: establece los umbrales adaptativos:

$$T_{high} = \mu_G + 2\sigma_G \;\; ; \;\; T_{low} = \mu_G - 0{,}5\,\sigma_G \tag{2.8}$$

donde T_{high} es el umbral superior de histéresis de Canny, que determina los píxeles de borde definitivos, en niveles de gris; y T_{low} es el umbral inferior, que determina los píxeles candidatos conectados a bordes definitivos, en niveles de gris.

Paso 4: ejecuta Canny con los umbrales calculados sobre la ROI y clasifica el vaso según el número de píxeles de borde en la zona perimetral y la desviación radial máxima ΔR. Este recálculo en cada fotograma elimina la necesidad de re-calibración manual al cambiar de formato de vaso.

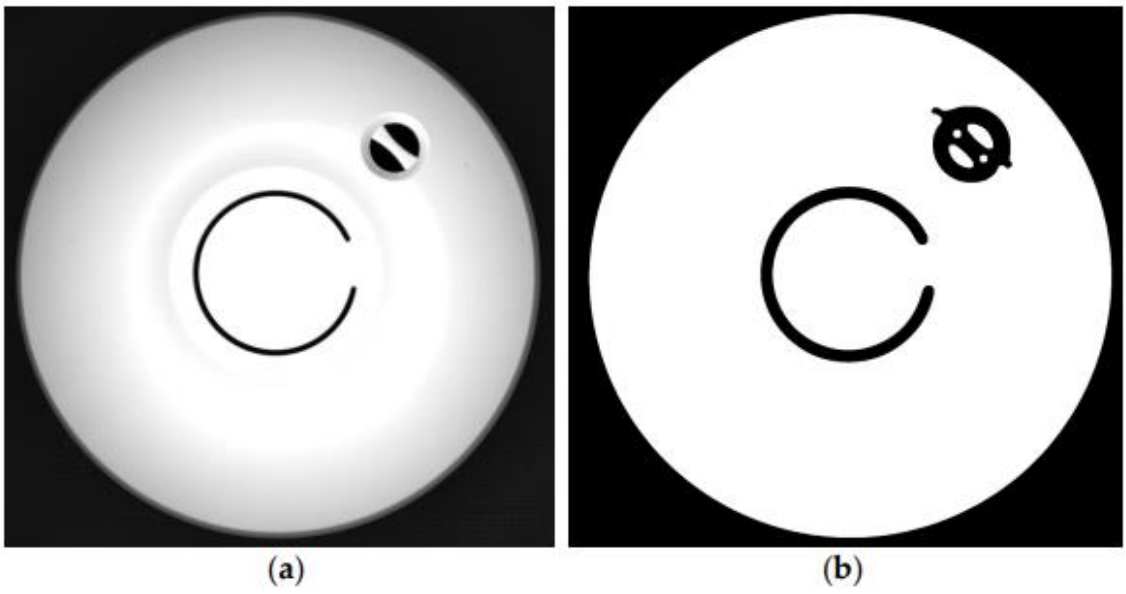


Imagen 2.1. Imagen original de pieza inyectada de PP (a) y máscara de bordes generada automáticamente por el detector de Canny (b), donde la región activa de inspección queda delimitada excluyendo los bordes geométricos de la pieza. Adaptado de Rotter et al (2024).

2.1.4.2 Momentos Invariantes de Hu para Clasificación del Posicionamiento de Etiqueta

Los momentos de Hu son siete descriptores escalares, invariantes simultáneamente a traslación, rotación y escala, derivados de los momentos geométricos centrales normalizados de una región de imagen. Su construcción parte del momento crudo m_{pq} de la función de intensidad I(x, y):

$$m_{pq} = \sum_x \quad \sum_y \quad x^p \tag{2.9}$$

donde m_{pq} es el momento crudo de orden p+q de la imagen; x e y son las coordenadas del píxel, en píxeles; p y q son los órdenes del momento en las direcciones horizontal y vertical; e I(x, y) es la intensidad del píxel, en niveles de gris. Los momentos centrales u_{pq} eliminan la dependencia de traslación desplazando el origen al centroide ($\bar{x} = m_{10}/m_{00}$; $\bar{y} = m_{01}/m_{00}$). Los momentos centrales normalizados $n_{pq} = u_{pq}$ / m00^((p+q+2) /2) eliminan adicionalmente la dependencia de escala. Hu (1962) demostró que existen exactamente siete combinaciones algebraicas independientes de n_{pq} invariantes también a rotación,

denominadas φ_1 a φ_7. En la práctica se opera sobre sus logaritmos para uniformizar la escala numérica:

$$\Phi_i = -sign(\varphi_i) \cdot log_{10} \tag{2.10}$$

donde Φ_i es la versión logarítmica del i-ésimo momento invariante de Hu, adimensional; y la función sign(φ_i) preserva el signo de la invariante. La Tabla 2.1 resume los siete invariantes y su rol en la clasificación de la posición de la etiqueta IML.

Tabla 2.1. Los siete momentos invariantes de Hu y su rol en la clasificación de etiqueta IML.

Invariante	**Qué mide geométricamente**	**Aplicación en etiqueta IML**	**Sensibilidad**
φ_1	Inercia total — extensión de la región	Detecta descentrado lateral de la etiqueta respecto al eje del vaso	Alta
φ_2	Asimetría bilateral de la intensidad	Detecta rotación de la etiqueta respecto al eje vertical	Alta
φ_3	Sesgo en la diagonal principal	Detecta inclinación oblicua del borde de la etiqueta	Media
φ_4	Irregularidad del contorno	Detecta arrugamiento o burbuja de aire bajo la etiqueta IML	Media
φ_5	Interacción asimetría horizontal y diagonal	Diferencia etiqueta correcta de etiqueta girada 90° o 180°	Complementaria
φ_6	Asimetría respecto a ambos ejes	Detecta reflexión — etiqueta espejada o defecto de impresión	Complementaria
φ_7	Único NO invariante a reflexión	Detecta etiqueta colocada al revés en el molde IML	Complementaria

El criterio de decisión compara el vector Φ = [φ1, …, φ7] de cada vaso con el vector de referencia Φ_ref del lote activo mediante la distancia euclidiana normalizada:

$$\varepsilon_{Hu} = \frac{\|\Phi\|_2}{\|\Phi_{ref}\|_2} \tag{2.11}$$

donde ε_{Hu} es el índice de diferencia de posicionamiento de la etiqueta, adimensional; Φ es el vector de momentos del vaso inspeccionado; y Φ_{ref} es el vector de referencia del lote activo. Si ε_{Hu} supera un umbral de rechazo (determinado estadísticamente durante la puesta en marcha a partir de la distribución de vasos conformes), el vaso se clasifica como "Falla Etiqueta". Rashid et al. (2025) y Ha & Jeong (2021) confirman que los momentos de Hu son aplicables en tiempo real en plataformas de cómputo embebido industrial sin impacto significativo en el presupuesto de tiempos del flujo.

2.1.4.3 Principios del Sistema Neumático de Descarte Selectivo

El sistema de descarte selectivo comprende dos cilindros de descarte —actuadores neumáticos lineales— dispuestos en serie sobre el carril de inspección de la faja transportadora, cuya función es expulsar transversalmente los vasos no conformes hacia rampas de acopio segregadas por tipo de defecto, sin interrumpir el flujo de la línea. La arquitectura de doble cilindro de descarte en serie permite clasificar dos tipos de defecto de forma independiente con un solo canal de control por actuador (Rashid et al., 2025). La fuerza de avance teórica del vástago de un cilindro neumático de doble efecto se obtiene del equilibrio de presiones sobre el área del émbolo:

$$F = P \cdot A_{émbolo} = P \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \tag{2.12}$$

donde F es la fuerza de avance del vástago, en newton; P es la presión de alimentación de la red neumática, en pascal; $A_{émbolo}$ es el área transversal del émbolo, en metros cuadrados; y d es el diámetro interno del émbolo, en metros. La selección del diámetro se realiza mediante el criterio de eficiencia energética: el mínimo diámetro normalizado (ISO 6432) que supere la fuerza requerida con un factor de seguridad aceptable, minimizando el consumo de aire

por ciclo. Rashid et al. (2025) cuantificaron que la selección bajo este criterio reduce el consumo del compresor entre un 18 % y un 32 % en aplicaciones de clasificación continua. El tiempo de ciclo del cilindro de descarte —conmutación de válvula, avance del vástago y retorno— debe ser significativamente menor que el intervalo entre vasos consecutivos, eliminando cualquier riesgo de colisión cinemática.

2.1.4.4 Arquitectura de Hardware de Adquisición de Imagen

Para que el algoritmo PDI opere de manera determinista, la cadena de adquisición debe garantizar una relación señal-ruido (SNR) superior a 30 dB sobre la superficie del vaso IML. Las superficies de polipropileno inyectado y las películas de las etiquetas IML presentan un coeficiente de reflectancia especular $\rho s > 0{,}6$, que genera zonas de saturación lumínica bajo incidencia de luz directa. Rotter et al. (2024) demostraron que la variabilidad de iluminación —no el algoritmo de detección— es la causa primaria de falsos positivos en sistemas de inspección de piezas inyectadas: bajo iluminación no controlada, las tasas de falsos positivos superan el 5 %, mientras que la combinación de iluminación difusa con umbralización adaptativa las reduce por debajo del 2 %.

La solución adoptada es un domo LED de iluminación difusa cuya geometría interior está revestida con sulfato de bario ($BaSO_4$) de reflectancia ≥ 98 %, que produce una distribución Lambertiana perfecta —independiente del ángulo de observación— al hacer rebotar múltiples veces la radiación de los anillos LED antes de incidir sobre el vaso. El domo integra anillos LED de iluminación estroboscópica sincronizada con el obturador de la cámara mediante señal digital desde el PLC, garantizando que cada imagen se adquiere bajo las mismas condiciones fotométricas con independencia de la iluminación ambiental del taller. Las dimensiones específicas del domo se presentan en el Capítulo 3.

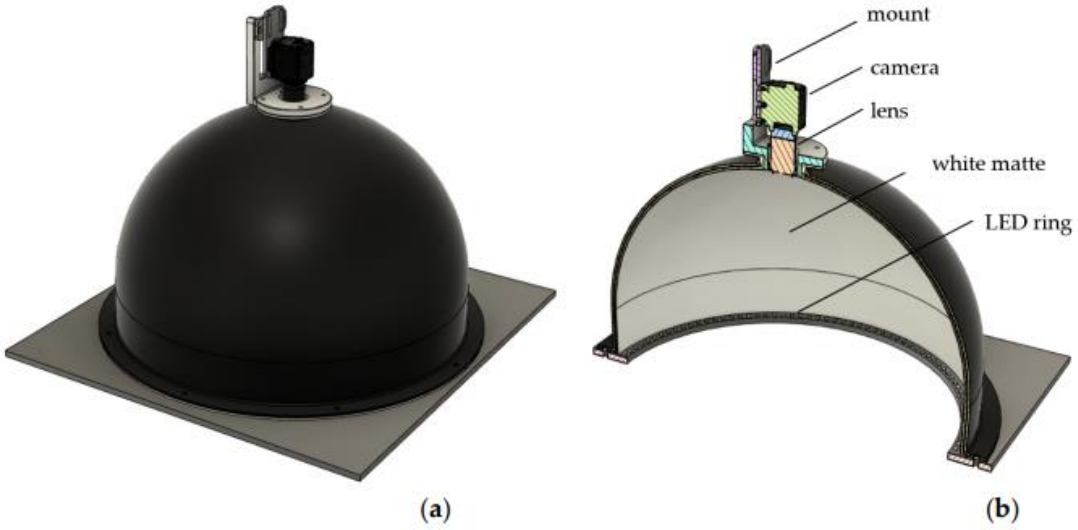


Imagen 2.2. Modelo CAD del domo de iluminación difusa (a) y sección transversal con el anillo LED interior orientado hacia arriba (b), que produce distribución Lambertiana por reflexión múltiple en la superficie de acabado blanco mate. Adaptado de Rotter et al (2024).

La resolución espacial del sensor se determina por el criterio de Nyquist de imagen: cada defecto detectable debe ocupar un mínimo de tres píxeles en su dimensión más pequeña para diferenciarse del ruido de cuantización. Para un defecto mínimo de tamaño Δ_min y un campo visual FOV:

$$N_{px,mín} = \left(\frac{FOV}{\Delta_{min}}\right) \times 3 \tag{2.13}$$

donde N_px,mín es el número mínimo de píxeles requerido en la dimensión crítica; FOV es el campo visual en la dirección de inspección, en milímetros; y Δ_min es el tamaño mínimo del defecto a detectar, en milímetros. La transmisión de imagen se realiza mediante el estándar GigE Vision (IEEE 802.3ab), que opera a 1 Gbit/s con fluctuación < 0,1 ms gracias al marcado temporal por hardware (Ha & Jeong, 2021; Vieira et al., 2024). La selección del modelo de cámara y la verificación con los parámetros específicos del proyecto se desarrollan en el Capítulo 3.

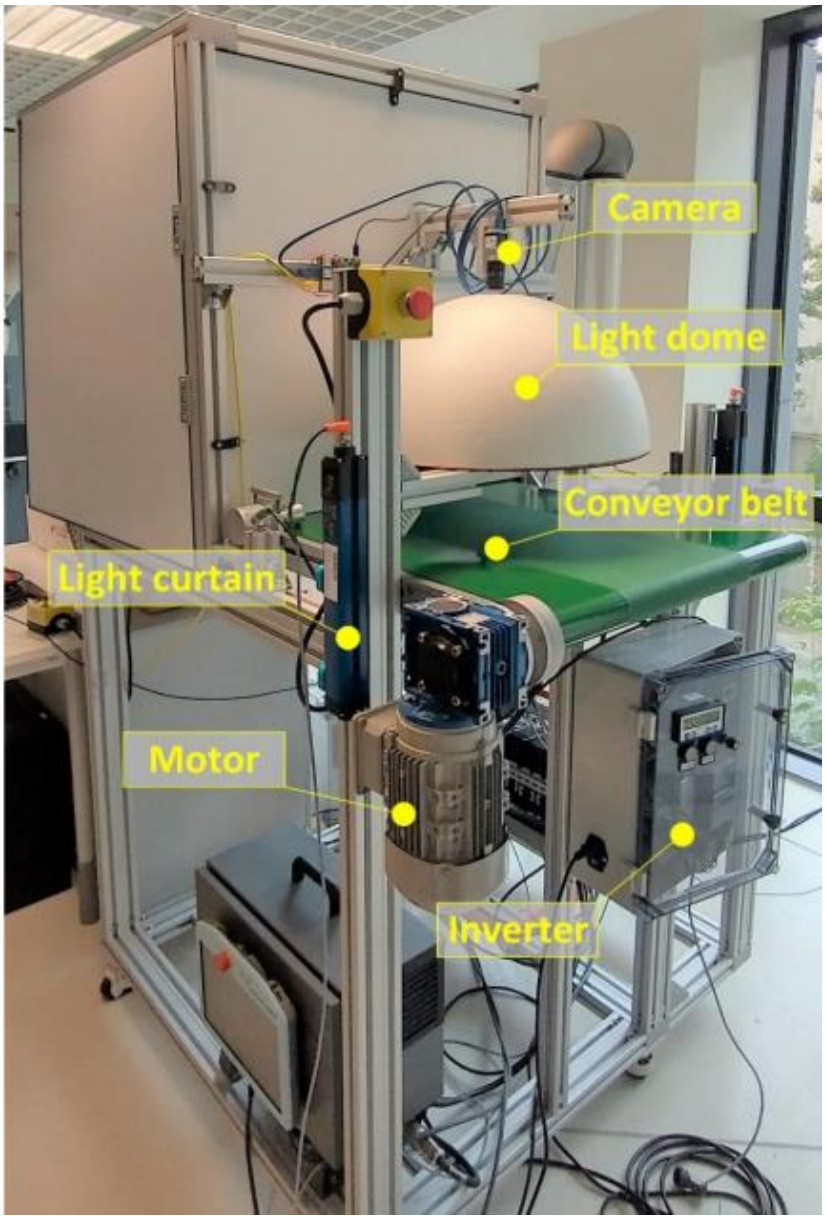


Imagen 2.3. Puesto de inspección óptica en línea: faja transportadora, domo LED montado sobre estructura fija y cámara CMOS integrada en la apertura superior del domo, garantizando condiciones fotométricas reproducibles entre ciclos. Adaptado de Rotter et al (2024).

2.1.4.5 Presupuesto de Tiempos del Flujo PDI

El sistema de visión debe emitir el veredicto de calidad antes de que el vaso llegue a la zona de activación de los actuadores de descarte. Dado que la faja avanza a velocidad constante

v, el tiempo máximo disponible entre adquisición y activación del actuador depende de la distancia física entre el punto de inspección y el punto de $descarte\ d\_cam - kick$:

$$t_{disponible} = \frac{d_{cam-kick}}{v} \tag{2.14}$$

donde $t_{disponible}$ es el tiempo máximo disponible, en segundos; $d\_cam - kick$ es la distancia entre el punto de inspección y el actuador, en metros; y v es la velocidad de la faja, en metros por segundo. Para garantizar robustez ante sobrecargas del sistema operativo y picos de tráfico de red en planta, el tiempo de procesamiento total T_{total} debe satisfacer:

$$T_{total} = T_{adq} + T_{PDI} + T_{comm} \ll t_{disponible} \tag{2.15}$$

donde T_{adq} es el tiempo de adquisición y transferencia de imagen (dominado por el protocolo GigE Vision), T_{PDI} es el tiempo de procesamiento del algoritmo (preprocesado, Canny y momentos de Hu) y T_{comm} es la latencia de comunicación hasta el PLC. Maślanka et al. (2025) validaron que la comunicación Modbus TCP sobre Ethernet industrial presenta latencias de activación menores a 5 ms en ciclos de inspección PLC-visión. Los valores específicos de cada componente del presupuesto de tiempos para el proyecto INROPLAS se presentan en el Capítulo 3.

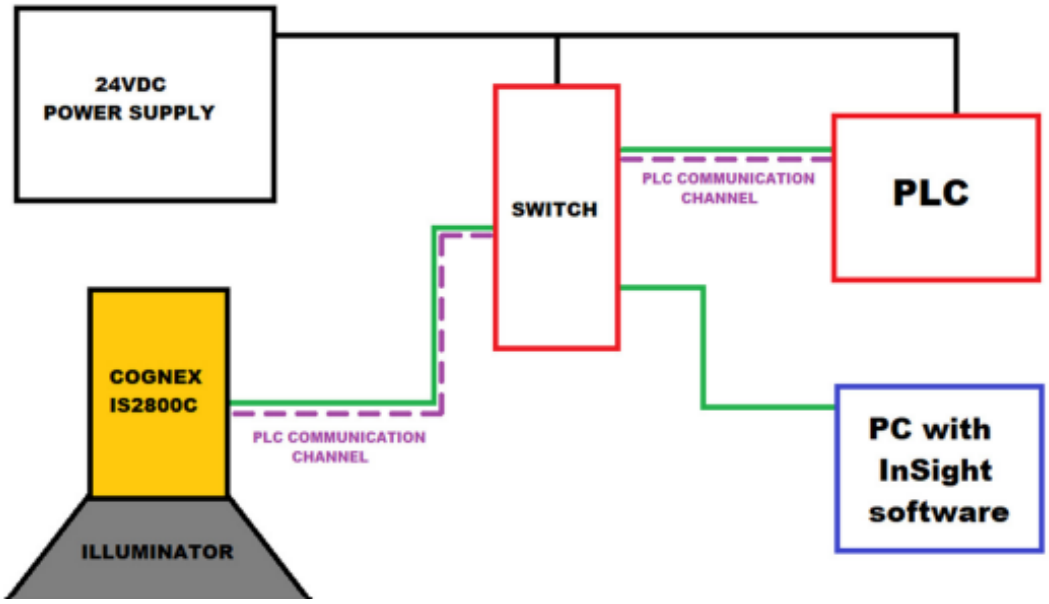


Imagen 2.4. Diagrama de bloques del sistema de inspección visual integrado con PLC: la cámara transmite el resultado de clasificación al controlador vía Modbus TCP, representando

la componente T_{comm} del presupuesto de tiempos del flujo PDI. Adaptado de Maślanka et al. (2025).



Imagen 2.5. Imágenes representativas de piezas inyectadas capturadas con cámara GigE Vision en producción continua: (izquierda) pieza conforme; (derecha) pieza defectuosa. El sistema PDI debe emitir veredicto antes de que la pieza alcance el actuador de descarte. Adaptado de Ha & Jeong (2021, Fig. 6).

2.1.5 Arquitectura de Validación Virtual (Simulación en Lazo Cerrado de Software)

La validación del sistema se apoya en ejecutar la lógica de control real contra un modelo de las señales de la planta, manteniendo separado el entorno de simulación del procesamiento del PLC. Esta arquitectura, conocida como simulación en lazo cerrado de software (Software-in-the-Loop, SITL), permite depurar el programa del PLC y de la interfaz de operador en un entorno seguro y comprobar que la secuencia lógica y las funciones de seguridad se ejecuten como se diseñaron, antes de cualquier implementación física. La Imagen 2.6 muestra el esquema de bloques.

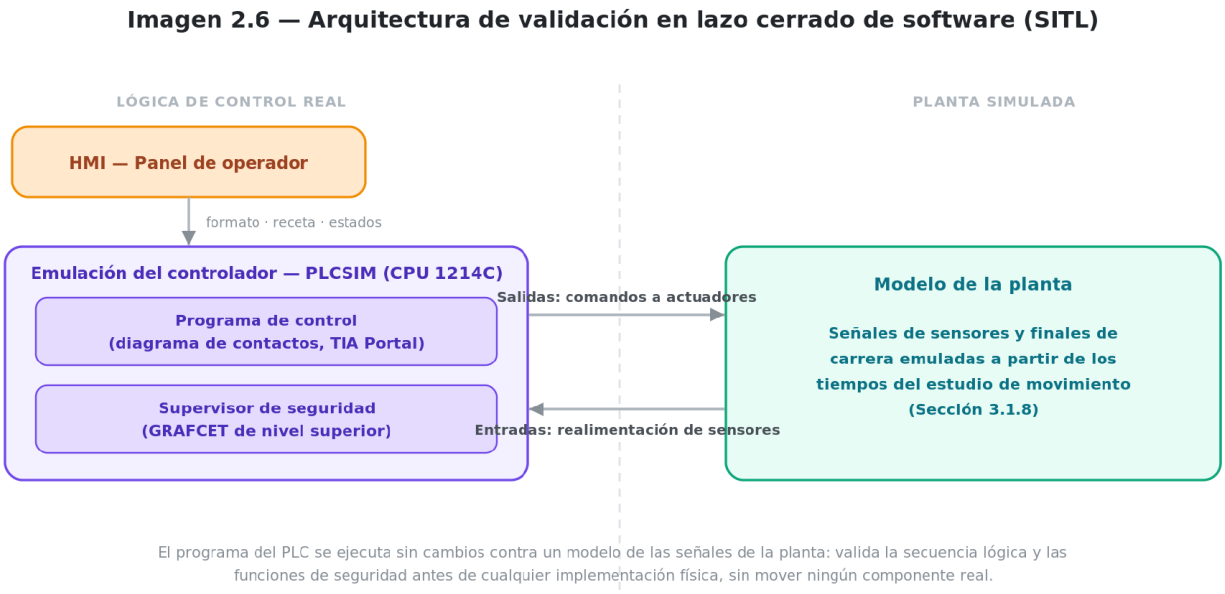


Imagen 2.6. Arquitectura de validación virtual en lazo cerrado de software (SITL).

2.1.6 Aerodinámica de Sustratos Flexibles: Chorro de Aire Radial

Cuando el vaso embolsado se asienta en el elevador el faldón —el exceso de película del borde superior de la bolsa wicket— debe ser acomodado hacia el interior para permitir la formación de una torre de vasos. El contacto mecánico no es viable: rozar una película de pocas micras puede arrugarla, rasgarla o cargarla de electricidad estática, lo que la haría adherirse al propio cabezal. Por ello se emplea un anillo soplador que actúa sin contacto, distribuyendo una cortina de aire perimetral y uniforme que abate el faldón de manera suave.

Diseño del pleno toroidal. Para que la cortina salga con la misma velocidad en todo el perímetro, la cámara interna del anillo (el pleno) debe ser mucho mayor que la ranura de salida. Esta relación se expresa como:

$$AR = \frac{A_{pleno}}{A_{ranura}} \tag{2.16}$$

donde AR es la relación de áreas, adimensional; A_{pleno} es el área transversal de la cámara interna del anillo, en metros cuadrados; y A_{ranura} es el área de la ranura perimetral de salida, en metros cuadrados. Al hacer el pleno mucho mayor que la ranura, el aire que ingresa se frena dentro de la cámara y recupera presión estática de forma uniforme, de modo que la ranura se vuelve la única restricción del sistema y emite un soplado radial homogéneo.

La velocidad de salida del chorro y el caudal másico se estiman, para flujo incompresible, con las ecuaciones de Bernoulli y de continuidad, corregidas por el coeficiente de descarga de la ranura:

$$V_0 = C_d \sqrt{\frac{2\,\Delta P}{\rho}}, \qquad \dot{m} = \rho\, A_{ranura}\, V_0 \tag{2.17}$$

donde V_0 es la velocidad de descarga del chorro, en metros por segundo; C_d es el coeficiente de descarga de la ranura, adimensional; ΔP es la diferencia entre la presión del pleno y la atmosférica, en pascal; ρ es la densidad del aire, en kilogramos por metro cúbico; $\dot{m}$ es el caudal másico emitido, en kilogramos por segundo; y A_{ranura} es el área de la ranura, en metros cuadrados. Estas expresiones determinan el consumo de aire y la energía del chorro que se dimensionan en el Capítulo 3.

Prevención del efecto globo. El chorro sigue la curvatura de la rampa del anillo gracias a la adherencia de la capa límite. Si la rampa es demasiado pronunciada o la ranura demasiado gruesa, la capa límite se desprende antes de completar el giro y el aire se proyecta de forma desordenada hacia el interior, inflando la bolsa en sentido contrario; este fenómeno se conoce en el empaque flexible como efecto globo. Para evitarlo, el ángulo físico de la rampa debe ser menor que el ángulo crítico de separación del chorro:

$$\theta_{rampa} < \theta_{sep} \tag{2.18}$$

donde es el ángulo de la rampa del anillo, en grados; y es el ángulo crítico al que el chorro se separaría de la superficie, en grados, estimado a partir del modelo de deflexión de chorros sobre superficies curvas formulado por Newman (1961). La condición de adherencia robusta —una ranura delgada seguida de un radio de empalme amplio— hace que el chorro, al permanecer pegado a la rampa, arrastre el aire perimetral y genere una succión hacia el eje que peina el faldón con suavidad; Liu et al. (2021) y Chávez-Módena et al. (2024) caracterizaron experimental y numéricamente este principio de manipulación neumática sin contacto en eyectores y amplificadores de aire de tipo Coanda. La Imagen 2.7 presenta el corte del anillo.$\theta_{rampa}\theta_{sep}$

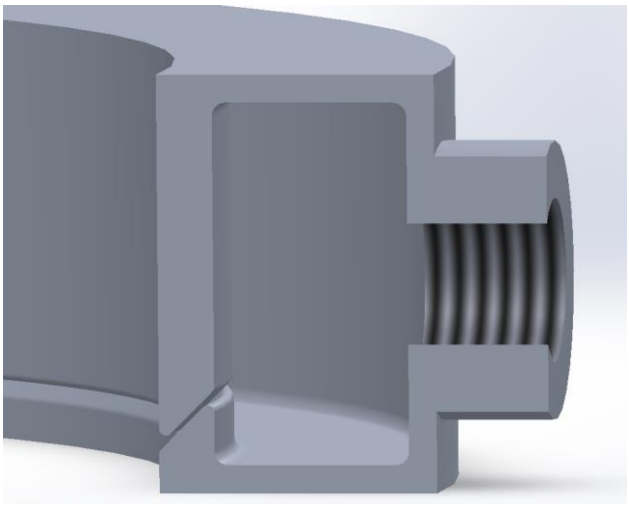


Imagen 2.7. Esquema en corte del anillo soplador de efecto Coanda.

2.1.7 Singulación de un Flujo Discreto de Baja Tasa

La inyectora entrega los vasos en grupos de cuatro dispuestos en una matriz cuadrada de dos por dos. Antes de inspeccionarlos es necesario ordenarlos en una sola fila. Para lograrlo se emplea un embudo de rieles que estrecha de manera progresiva el ancho del canal, apoyado en cuatro principios. Primero, la asimetría de los rieles: un riel recto y otro inclinado rompen la alineación de los pares de vasos y los obligan a entrar en fila (López-Rodríguez et al., 2019). Segundo, la altura del contacto: los rieles tocan el vaso a la altura de su centro de gravedad, de modo que la fuerza lateral no genera un brazo de palanca que lo vuelque. Tercero, la asimetría de fricción: la banda de la faja arrastra el vaso (fricción mayor) mientras los rieles lo dejan deslizar (fricción menor). Cuarto, una convergencia suave que evita comprimir y trabar los vasos en la garganta.

Conviene precisar el alcance de la analogía con los medios granulares. La literatura sobre atascamiento en silos y tolvas (Zuriguel et al., 2014) describe flujos densos y continuos; en este caso el flujo es discreto y de baja tasa —cuatro vasos cada dieciocho segundos—, por lo que esa literatura se utiliza de forma cualitativa, para orientar la geometría y los umbrales del embudo, y no para predecir directamente la frecuencia de atascos.

2.2 Estándares, Frameworks y Buenas Prácticas

2.2.1 Metodología OEE

La eficiencia global del equipo (Overall Equipment Effectiveness, OEE) es un indicador que combina la disponibilidad, el rendimiento y la calidad de un equipo para medir su productividad real frente a la ideal (Nakajima, 1988). En una línea IML continua, el diseño se subordina a maximizar el OEE de la inyectora, que es el recurso más costoso de la planta. De ahí la lógica de operación continua: los rechazos de la inspección o las demoras del encajado deben ser absorbidos por el sistema automatizado sin obligar a detener el ciclo de inyección.

2.2.2 Framework Poka-Yoke

El enfoque Poka-Yoke consiste en diseñar mecanismos a prueba de errores que impidan que un defecto avance en el proceso. En este proyecto, la inspección por visión y los cilindros de descarte actúan como una barrera que retira el producto defectuoso y elimina la variabilidad del criterio humano durante la inspección a alta velocidad. El cabezal de sujeción aplica la misma idea: en lugar de ajustes mecánicos por formato, usa almohadillas intercambiables que evitan errores de configuración.

2.2.3 Abstracción Lógica en la Simulación Virtual

La validación de sistemas que combinan partes físicas y lógicas se apoya en separar lo que se simula de lo que se calcula. El movimiento de los cuerpos rígidos se valida con un modelo virtual tridimensional, mientras que el comportamiento de los cuerpos blandos e impredecibles —como la bolsa de polietileno— se valida de forma analítica, con las ecuaciones de neumática y fricción. Esta separación concentra el esfuerzo de cómputo donde aporta más valor.

2.3 Marco Normativo

2.3.1 Estándar de Control IEC 61131-3

La norma internacional IEC 61131-3 estandariza la arquitectura y los lenguajes de programación de los controladores lógicos programables. Aporta rigor a las lógicas secuenciales y abarca lenguajes como el diagrama de contactos (Ladder) y el texto

estructurado, empleados para coordinar los ejes del pórtico y disparar los actuadores neumáticos.

2.3.2 Seguridad de Maquinaria ISO 12100

La norma ISO 12100 establece los principios generales para diseñar maquinaria segura mediante una evaluación iterativa de riesgos. De ella se desprende la obligación de instalar resguardos perimetrales alrededor del radio de acción del manipulador y de canalizar el descarte por rampas cerradas, de modo que se asegure la separación física entre el operario y las zonas de atrapamiento.

2.3.3 Energía Neumática ISO 4414 y Prevención de Arranque Inesperado

La norma ISO 4414 fija las reglas generales y los requisitos de seguridad de los sistemas neumáticos. Dado que buena parte del accionamiento del sistema es neumático —la trampilla, las ventosas, el anillo soplador, el tope de separación, los cilindros de descarte y los del cabezal—, esta norma gobierna la preparación del aire (filtración y regulación para una fuerza repetible), el escape controlado de la presión y la prevención de movimientos inesperados al restablecerse el suministro, en línea con la norma ISO 14118. La detención de emergencia se rige por la norma ISO 13850. El asistente de inserción, al ser servo-eléctrico, queda fuera del alcance neumático. En conjunto, estas normas aseguran que el accionamiento neumático del sistema sea seguro, repetible y libre de movimientos inesperados ante la pérdida o el restablecimiento del suministro de aire.

2.3.4 Seguridad Funcional del Control ISO 13849-1

La norma ISO 13849-1 complementa a la ISO 12100 en el dominio del control: establece cómo diseñar las partes del sistema de control relacionadas con la seguridad y define el nivel de prestación (Performance Level, PL) que cada función de seguridad debe alcanzar según el riesgo que cubre. Sobre esta base se definen las funciones de seguridad que emplea el sistema: el par seguro desconectado (Safe Torque Off, STO), que retira el par de los servomotores sin necesidad de cortar su alimentación de control; la parada segura de categoría 1 (Safe Stop 1, SS1), que primero desacelera el eje de forma controlada y solo entonces aplica el par seguro desconectado; y el frenado seguro (Safe Brake Control, SBC), que gobierna el freno mecánico de los ejes verticales para que la carga no caiga al retirarse el par. El nivel de prestación exigido a cada función se fija a partir de la evaluación de riesgos

que prescribe la ISO 12100, la cual queda como paso previo a la implementación. En este marco se integran también la detención de emergencia (ISO 13850) y la prevención del arranque inesperado (ISO 14118).

Capítulo 3: Desarrollo del Proyecto

Este capítulo traduce los requisitos operativos y los fundamentos del Capítulo 2 en una solución concreta. Se describen el diseño de cada estación, los cálculos que dimensionan los componentes críticos, la validación estructural por elementos finitos y el estudio de tiempos.

3.1 Diseño de la Solución

El diseño se organiza en módulos funcionales que conducen el vaso desde la salida de la inyectora hasta la caja. El modelo tridimensional se construyó con una metodología descendente (top-down): un archivo de esqueleto que contiene solo planos de referencia gobierna las dimensiones principales, y cada pieza se relaciona contra ese esqueleto y no contra las demás. Así, un cambio en una cota no se propaga como error por todo el ensamble. El modelo se divide en subensambles independientes —pórtico, enfundado-apilado, asistente de inserción, y zona de faja—, lo que facilita el trabajo en paralelo y la detección de interferencias.

Sistema de coordenadas. Para todo el informe se adopta un único marco de referencia, coincidente con el del modelo y el de los análisis por elementos finitos, con el fin de que las imágenes y los resultados se lean sin reinterpretar signos. El eje Y es la vertical (la altura; la gravedad actúa en −Y); el eje X es la dirección transversal hacia la Zona Libre, donde se desplaza el pórtico y se ubican las cajas; y el eje Z es la dirección de flujo de la faja, por la que los vasos avanzan hacia la estación de enfundado. El origen se sitúa a nivel del piso (Y = 0), de modo que todas las alturas del sistema se miden desde el suelo de la planta. La Imagen 3.1 ilustra esta convención.

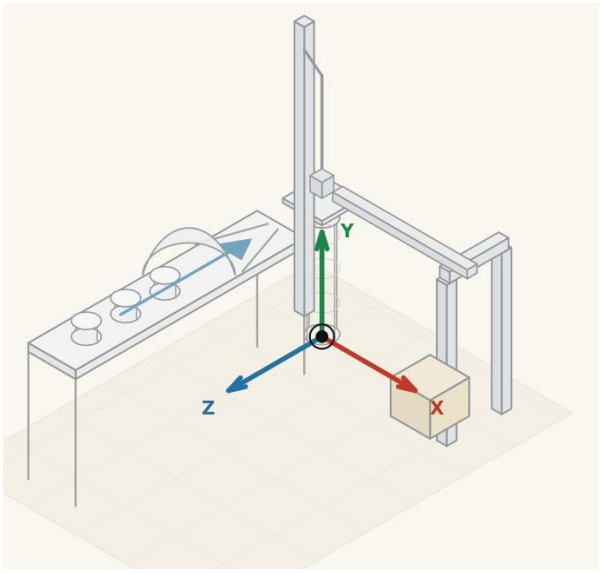


Imagen 3.1. Sistema de coordenadas adoptado para el diseño (vertical = Y).

3.1.1 Parámetros y Especificaciones de Diseño

Las dimensiones y las restricciones del sistema se derivan de la familia de productos y de los formatos de embalaje de INROPLAS. La línea maneja cuatro formatos de vaso —12, 16, 20 y 32 OZ—, cuya geometría, masa y receta de apilado se resumen en la Tabla 3.1. La altura de la torre se obtiene del crecimiento lineal del apilado:

$$H_{torre} = H_{vaso} + (N - 1)\, P_{nesting} \tag{3.1}$$

donde H_{torre} es la altura de la torre, en milímetros; H_{vaso} es la altura del vaso individual, en milímetros; N es el número de vasos por torre definido por la receta comercial; y $P_{nesting}$ es el paso de anidamiento entre vasos consecutivos, en milímetros. La cantidad de vasos por torre se fija para que la altura de la torre no supere los 500 mm útiles de la caja, evitando aplastar los vasos de la base.

Por ejemplo, para el formato 12 OZ (26 vasos, paso de anidamiento 15,1 mm) la altura de la torre es:

$$H_{torre} = 121{,}3 + (26 - 1) \cdot 15{,}1 \approx 499\ mm \tag{3.2}$$

Tabla 3.1. Parámetros geométricos y recetas de apilado por formato.

Formato	Diámetro de boca (mm)	Altura (mm)	Masa unitaria (g)	Vasos por torre	Paso de anidamiento (mm)	Masa de la torre (kg)
12 OZ	78,0	121,3	25,5	26	15,1	0,663
16 OZ	82,0	136,6	30,4	26	14,5	0,790
20 OZ	95,0	148,0	33,7	23	16,0	0,775
32 OZ	105,0	171,3	42,0	18	19,3	0,756

El sistema aloja las torres en una caja de cartón normalizada, cuyas dimensiones y disposición se resumen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Caja de embalaje y su capacidad.

Tipo de caja	Base (mm)	Altura (mm)	Disposición de torres
Merch	380 × 460	520	12 y 16 OZ: 20 torres de pie (matriz 4×5); 20 y 32 OZ: 12 torres (matriz 3×4)

A partir de estos datos se establecen los requisitos de diseño: anclaje suspendido de los actuadores verticales a la perfilería para dejar despeje con el piso; ubicación del módulo de enfundado por debajo del plano de la faja para protegerlo del giro de las compuertas; y rigidez del voladizo del pórtico suficiente para soportar las inercias del cabezal y de la torre sin vibración apreciable.

Cadencia de caja. La caja aloja las torres de pie según la matriz que admite cada formato: veinte torres (matriz 4×5) en los formatos de menor diámetro (12 y 16 OZ) y doce torres (matriz 3×4) en los de mayor diámetro (20 y 32 OZ), que ocupan más base. Al ritmo de la inyectora, una caja se completa entre 16 y 39 minutos según el formato, lo que equivale a entre 1,5 y 3,7 cajas por hora y cuya manipulación (cambio de caja) representa la única intervención manual frecuente del supervisor. La capacidad de la célula automatizada, cercana a 1220 vasos por hora, supera con holgura los 800 vasos por hora de la inyectora, de modo que el cambio de caja no atrasa la línea.

3.1.2 Arquitectura General del Sistema

El sistema se acopla a la salida de la faja de la inyectora IML y procesa el vaso a través de cinco estaciones consecutivas:

- **Estación 1 — Recepción y singulación:** los cuatro vasos que llegan en matriz se ordenan en una sola fila mediante un embudo de rieles, y un tope de separación los libera de uno en uno con espacio entre sí.
- **Estación 2 — Inspección y descarte:** un conjunto de cinco cámaras inspecciona cada vaso y, si presenta un defecto de etiqueta o de rebaba, un mecanismo lo expulsa de la línea hacia el contenedor correspondiente.
- **Estación 3 — Enfundado:** el vaso cae por una trampilla e ingresa en una bolsa wicket que se abre por succión; un anillo soplador acomoda el faldón de la bolsa sin contacto.
- **Estación 4 — Apilado:** el asistente de inserción empuja el vaso hacia abajo, rasga los precortes de la bolsa y lo anida en la torre, que se forma sobre un elevador que desciende un paso por vaso.
- **Estación 5 — Encajado:** al completarse la receta, el robot pórtico sujeta la torre por presión radial y la deposita en la caja.

3.1.3 Diseño Mecánico y Neumático

A continuación, se describe el diseño de cada módulo, indicando su función, la solución adoptada con su componente comercial y la justificación. Las cotas de fabricación se reservan para los planos de fabricación (Anexo E).

Recepción y singulación. La estación recibe los vasos sobre una faja transportadora Dorner 3200 de banda plana, de 457 mm de ancho, con perfil lateral bajo de borde abierto y banda de acumulación de baja fricción. La cara superior de la banda se encuentra a 1200 mm del piso y fija el plano de trabajo del proceso. Sobre ella, un embudo de rieles asimétricos —un riel recto y otro inclinado— estrecha el canal y fuerza la fila única; los rieles son pasivos durante la marcha y su separación se ajusta manualmente por formato, mediante varillas intercambiables fijadas con perilla, sin actuadores. Como el embudo ordena los vasos, pero no los separa, un tope de separación transversal —un cilindro neumático guiado Festo DFM-16-160-B-P-A-GF con una pala— cruza el carril y libera los vasos de uno en uno, con la

distancia que requiere la inspección. El ordenamiento y la separación se verificaron mediante una simulación descrita en la Sección 3.1.4.

Inspección y descarte. La inspección de cada vaso la realiza una estación de visión artificial de cinco cámaras industriales dispuestas alrededor del vaso —cuatro laterales para verificar la posición de la etiqueta y una cenital para detectar la rebaba—, alojadas en un domo de iluminación difusa compartido. El detalle del equipo, del algoritmo de inspección y de los criterios de aceptación y rechazo se presenta en la Sección 3.1.6.

Tras la inspección, los vasos no conformes se retiran con dos cilindros de descarte, uno por tipo de defecto. Cada uno es un cilindro neumático DSNU-20-300-PPV-A cuyo vástago lleva una cuña de PA66 con cara cóncava que abraza el vaso y lo desliza fuera del borde abierto de la faja hacia una rampa de gravedad. La cuña contacta el vaso a la altura de su centro de gravedad para empujarlo como un cuerpo estable durante el barrido —sin que vuelque ni se atraviese sobre el propio carril—, y la carrera de 300 mm lo lleva más allá del borde abierto de la banda, donde cae a la rampa de gravedad con independencia del arrastre de la faja; ese vuelco final sobre el borde, hacia la rampa, es el objetivo del descarte, no una falla. Las rampas son canales cerrados que conducen el vaso a contenedores separados por tipo de defecto: la falla de etiqueta va a molienda y la de rebaba a reparación manual.

Enfundado. El vaso llega al final de la faja y un transicionador lo lleva hasta el centro de la trampilla: dos cilindros guiados —uno vertical DFM-40-200-P-A-KF que sostiene a uno horizontal DFM-25-200-P-A-GF— lo empujan unos 200 mm con una placa cóncava que lo desplaza sin volcarlo. A diferencia del cilindro de descarte de la estación de inspección, que retira el vaso de la línea, el transicionador debe dejarlo de pie y centrado sobre la trampilla, por lo que lo empuja con aceleración suave para no volcarlo. Allí, una trampilla de doble compuerta, accionada por dos actuadores giratorios DRVS-12-180-P de apertura rápida, se abre y deja caer el vaso dentro de la bolsa. El producto se embolsa en una bolsa wicket: una bolsa de polietileno precortada que se cuelga por unos orificios de su borde superior (el wicket), disposición habitual en el embolsado automatizado porque mantiene las bolsas ordenadas y permite tomarlas de una en una. Las bolsas se almacenan en un magazine vertical con una placa de respaldo empujada por resortes, que mantiene la primera bolsa siempre en el mismo plano —al alcance de la ventosa— a medida que la pila se consume. Antes de que caiga el vaso, la bolsa se abre con un cilindro DFM-16-150-B-P-A-GF y dos ventosas de fuelle VASB-30-1/8-PUR-B que sujetan su cara frontal y retroceden

manteniendo el vacío; como la cara posterior queda retenida, la bolsa se separa y queda abierta. La adherencia electrostática entre las películas de polietileno, que tiende a mantenerlas pegadas, es una dificultad conocida del manejo de estos empaques; el diseño la sortea separando la bolsa por succión y acondicionando el faldón sin contacto, lo que evita el rozamiento que la cargaría aún más. Finalmente, con el vaso ya dentro de la bolsa, el anillo soplador de efecto Coanda acomoda el faldón hacia el centro.

Apilado. El apilado lo realiza el asistente de inserción, un actuador servo-eléctrico ESBF-BS-63-800-25P montado verticalmente sobre la trampilla. Su perfil de velocidad y su control de fuerza permiten un descenso en tres fases —aproximación rápida, asentamiento y rotura de los precortes con fuerza controlada, y retorno rápido— que anida el vaso en la torre sin dañarlo. El husillo de paso 25 mm le da una velocidad de hasta 1,35 m/s, suficiente para cumplir el tiempo de ciclo. El mástil que soporta el asistente de inserción se arriostra lateralmente contra la columna estructural del apilado de torres, lo que eleva su primera frecuencia natural y lo aleja del rango de excitación de la estación (Sección 3.1.5). Una jaula ajustable de cuatro varillas guía la caída y centra la torre, y un elevador de indexación EGC-70-600-BS desciende un paso por cada vaso, manteniendo la cima de la torre a altura constante.

Encajado. El encajado lo ejecuta un robot pórtico de tres ejes —EGC-80-1000-TB en X, EGC-70-800-BS en Y y ESBF-BS-63-600-10P en Z— que se desplaza por la zona libre. Su efector es un cabezal en forma de herradura que sujeta la torre exclusivamente por presión radial sobre el vaso de la base, sin placa de apoyo inferior: la torre descansa sobre el elevador y el cabezal la toma por fricción con tres microcilindros ADN-16-15-I-P-A dispuestos a 120°, provistos de almohadillas de poliuretano intercambiables por formato. El cabezal se aproxima en horizontal, cierra sobre el vaso base y, una vez sujeta la torre, el elevador desciende para liberarla y el robot la traslada a la caja. Por su abertura lateral, el cabezal en herradura no dispone de holgura para depositar la última torre de cada caja —la que queda rodeada por las demás—; esa torre se entrega en un nido instrumentado, junto a la célula, y el operario la inserta durante el cambio de caja, con la máquina en parada segura. Por ello el cupo de torres que coloca el robot se fija, mediante la interfaz de operador, en la capacidad de la caja menos una.

Materiales. La Tabla 3.3 resume los materiales asignados a las piezas a medida y a los elementos de desgaste, escogidos por su relación entre resistencia, peso y resistencia a la

corrosión, compatible con un entorno cercano a producto alimentario. El listado completo de componentes comerciales y de piezas a medida se presenta en el Anexo A.

Tabla 3.3. Materiales asignados por grupo de piezas.

Grupo de piezas	**Material**
Piezas estructurales a medida y soportes	Aluminio 6061-T6
Perfilería estructural	Aluminio 6063-T6
Varillas del magazine, guías y jaula	Acero inoxidable AISI 304
Almohadilla de la plataforma del elevador	Poliuretano
Placa de desgaste del iris y punta del asistente de inserción	POM (acetal)
Cuña del actuador de descarte	PA66 (poliamida 6/6)

Cálculos aplicados

A partir de los modelos del Capítulo 2 se dimensionan los componentes críticos. Cuando un parámetro depende de un ensayo aún no realizado, se adopta un valor de diseño justificado y se deja indicado, de modo que el cálculo queda listo para actualizarse con el dato medido.

Carrera del asistente de inserción. El recorrido de trabajo por ciclo es de 720 mm: el asistente de inserción se retrae hasta una altura que libra la cima del vaso colocado sobre la trampilla y desciende hasta el asiento de la torre. El actuador seleccionado, de carrera nominal 800 mm, cubre ese recorrido con margen.

En la convención de ejes adoptada (Y vertical desde el piso), la carrera de trabajo es la diferencia entre la altura de retracción y la del asiento de la torre:

$$c_{Plug} = Y_{retr} - Y_{asiento} = 1400 - 680 = 720\ mm \tag{3.3}$$

Cortina de aire del anillo Coanda. Con la velocidad de descarga y el caudal de las ecuaciones de la Sección 2.1.6, y adoptando una densidad del aire $\rho = 1{,}20$ kg/m³, un coeficiente de descarga $C_d = 0{,}80$ y un diámetro de descarga de 180 mm, una ranura de espesor 0,15 mm alimentada con una sobrepresión de pleno de 5 kPa entrega una cortina de unos 73 m/s con un consumo de aire de aproximadamente 22 m³/h (370 NL/min) y un flujo másico de 7,4 g/s. La velocidad alta de la cortina decae muy rápido fuera de la ranura, por

lo que el acondicionamiento del faldón es enérgico en el borde y suave a milímetros de distancia, sin contacto. El espesor de la ranura y la presión del pleno se adoptan como valores de diseño y se confirmarían mediante ensayo en una etapa posterior, fuera del alcance de este trabajo.

La velocidad de la cortina se obtiene de la ecuación de descarga de la Sección 2.1.6, con coeficiente de descarga 0,80, densidad del aire 1,2 kg/m³ y sobrepresión de pleno 5 kPa:

$$v_s = C_d\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = 0{,}80 \cdot \sqrt{\frac{2\cdot 5000}{1{,}2}} \approx 73\ m/s \tag{3.4}$$

Con el área de la ranura perimetral, el flujo másico de la cortina es:

$$\dot{m} = \rho \cdot v_s \cdot A_{ranura} \approx 7{,}4\ g/s \tag{3.5}$$

Resortes de la placa de respaldo del magazine. El requisito es una fuerza de empuje casi constante y ligera a lo largo de toda la carrera de consumo de la pila de bolsas, suficiente para avanzarla venciendo el rozamiento de la guía, pero sin deformar la película. La solución adoptada son resortes de fuerza constante —cintas de acero enrolladas que entregan una fuerza casi invariable a lo largo de todo su recorrido, a diferencia de un resorte helicoidal, cuya fuerza crecería con la compresión—, repartidos en cuatro unidades para empujar la placa de forma pareja y evitar que se incline; sus tambores se fijan al bastidor y sus cintas se unen a la placa, mientras que las varillas actúan solo como guías de la placa, no como asiento de los resortes. La fuerza total se adopta como valor preliminar de diseño en unos 8 a 10 N, dentro de la ventana acotada más adelante (Ecuación 3.8): por encima del rozamiento de la placa sobre sus guías, para poder avanzar la pila, y por debajo de la presión que marcaría la película. La presión resultante sobre la pila es del orden de 0,5 kPa, inocua para la bolsa. La fuerza definitiva se ajustaría tras medir en banco el rozamiento real de la placa sobre sus varillas-guía, que es la resistencia que los resortes deben vencer.

Formalmente, la fuerza total se reparte entre las cuatro unidades y fija la presión sobre la pila. Cada resorte aporta:

$$F_u = \frac{F_t}{n} = \frac{10\ N}{4} \approx 2{,}5\ N \tag{3.6}$$

y la presión sobre la pila, con la fuerza total (del orden de 10 N) repartida sobre el área de contacto de la placa (unos 0,02 m²), es:

$$p = \frac{F_t}{A} \approx 0{,}5\ kPa \tag{3.7}$$

En síntesis, el resorte debe entregar una fuerza total dentro de una ventana: por encima del rozamiento de la placa sobre sus varillas-guía —para poder avanzar la pila— y por debajo de la que llevaría la presión al umbral que marcaría la película:

$$F_{roz} < F_t < A \cdot p_{adm} \tag{3.8}$$

Además, esa fuerza debe mantenerse aproximadamente constante a lo largo de toda la carrera de consumo de las bolsas, condición que cumplen los resortes de fuerza constante y no los helicoidales, cuya fuerza crecería con la compresión. El rozamiento de la placa, medido en banco, fijará el valor definitivo dentro de esa ventana.

Área de la ventosa. La fuerza de retención disponible de la ventosa es $F_{disp} = A\,|\Delta P_{vac}|$, donde A es el área efectiva de la ventosa, en metros cuadrados, y $|\Delta P_{vac}|$ es la diferencia entre la presión atmosférica y la de vacío, en pascal. Con dos ventosas de 30 mm de diámetro ($A = 707$ mm² cada una) y un nivel de vacío de unos 85 kPa, la fuerza disponible es de aproximadamente 120 N, frente a los cerca de 6 N necesarios para despegar la bolsa con un factor de seguridad de dos: un margen de unas veinte veces. El área de la ventosa no es, por tanto, el factor limitante; se elige amplia para tolerar el desalineamiento y las arrugas de la película.

La fuerza de retención disponible de las dos ventosas, de 30 mm de diámetro y con un vacío de 85 kPa, es:

$$F_{disp} = n \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \Delta p = 2 \cdot \frac{\pi}{4} (0{,}030\ m)^2 \cdot 85000\ Pa \approx 120\ N \tag{3.9}$$

Fuerza de agarre del cabezal. La fuerza normal mínima que cada almohadilla debe aplicar para que la torre no deslice es, por equilibrio vertical:

$$F_N = \frac{m\,(g+a)}{n\,(\mu\,cos\theta + sin\theta)} \tag{3.10}$$

donde F_N es la fuerza normal por almohadilla, en newton; m es la masa de la torre y la bolsa, en kilogramos; g es la aceleración de la gravedad; a es la aceleración vertical impuesta por el robot, en metros por segundo al cuadrado; n es el número de almohadillas; μ es el coeficiente de fricción entre la almohadilla de poliuretano y la pared de polipropileno del vaso; y θ es el semiángulo de conicidad del vaso, en grados. En el peor caso —la torre más

pesada, que es la del formato 16 OZ (26 vasos, 0,79 kg) más la bolsa, redondeada a 0,80 kg, con semiángulo $\theta = 5{,}49°$ y tres almohadillas—, la fuerza requerida está entre 7 y 17 N por almohadilla según el coeficiente de fricción y la aceleración. Cada microcilindro ADN-16 entrega cerca de 120 N a la presión de red, de modo que el margen frente a la fuerza requerida es de entre siete y dieciocho veces. La sujeción no está limitada por la fuerza disponible, sino por el criterio inverso de no aplastar el vaso de la base, por lo que la presión del cilindro se regula muy por debajo de su máximo. El coeficiente de fricción se confirmará por ensayo.

En el caso más exigente de la matriz de sensibilidad ($\mu = 0{,}3$ y $a = 15$ m/s²), con $m = 0{,}80$ kg, $\theta = 5{,}49°$ y $n = 3$ almohadillas, la fuerza requerida por almohadilla es:

$$F_N = \frac{0{,}80 \cdot (9{,}81 + 15)}{3 \cdot (0{,}3 \cdot cos\ 5{,}49° + sin\ 5{,}49°)} \approx 16{,}8\ N \tag{3.11}$$

y, con los 120 N que entrega cada microcilindro ADN-16 a la presión de red, el margen resulta:

$$margen = \frac{F_{ADN}}{F_N} = \frac{120\ N}{16{,}8\ N} \approx 7 \tag{3.12}$$

3.1.4 Validación de la Singulación por Simulación

El mayor riesgo del módulo de recepción es que el embudo no logre ordenar los vasos o que los atasque. Para evaluarlo antes de fabricar, se construyó una simulación física del flujo de vasos sobre la faja. El modelo representa el plano de la banda visto desde arriba: cada vaso es un disco rígido arrastrado por la fricción de la banda, en contacto con los rieles y con los demás vasos; la simulación es paramétrica, de modo que se varían la geometría del embudo y los coeficientes de fricción para observar indicadores cuantitativos —la probabilidad de atasco, el porcentaje de vasos que salen en fila única y la separación entre vasos consecutivos—. Como se indicó en la Sección 2.1.7, la simulación es comparativa: sirve para decidir qué geometría adoptar y en qué dirección ajustarla, no para predecir valores absolutos, que se calibrarían con los coeficientes de fricción reales.

Los resultados confirman el diseño. El embudo de rieles asimétricos, bien ajustado, ordena los vasos en fila única sin atascos; pero la separación máxima que logra por sí solo es de aproximadamente 11 mm, insuficiente para la inspección. Al incorporar el tope de separación, que libera los vasos de uno en uno, la separación se vuelve controlable mediante el intervalo de liberación: alcanza desde unos 120 mm hasta más de 400 mm según el

intervalo, manteniendo la ausencia de atascos y la fila única. Esto justifica el diseño adoptado —embudo pasivo de ajuste manual más un tope de separación—, descrito en la Sección 3.1.3. La Imagen 3.2 muestra una vista de la simulación.

En cuanto al ritmo, la simulación mantiene el 100 % de singulación, sin vasos dobles ni atascos, tanto en el formato menor como en el mayor, y entrega los vasos al ritmo con que la inyectora los produce, de modo que la recepción no condiciona el tiempo de ciclo (Sección 3.1.8).

Estabilidad vertical del vaso. El modelo es bidimensional (vista superior), por lo que valida el ordenamiento en fila única y la ausencia de atascos —su propósito—, pero no representa la inclinación del vaso fuera del plano. Como el vaso es troncocónico, se verifica que no vuelque; el umbral de vuelco depende solo de su geometría (la masa se cancela):

$$a_{vuelco} = g \cdot \frac{r_{base}}{h_c} \tag{3.13}$$

donde r_{base} es el radio de la base y h_c la altura del punto de contacto. Para un contacto a la altura del centro de gravedad, el umbral es del orden de 4 m/s² (Sección 3.1.8) y desciende a unos 2 m/s² en el caso más desfavorable de un contacto en el borde superior del vaso. Además, como el coeficiente de fricción de la banda ($\mu \approx 0{,}20$) es menor que la relación entre el radio de la base y la altura del centro de gravedad ($\approx 0{,}45$), el vaso arrastrado por la faja desliza antes de alcanzar el momento de vuelco: el arrastre de la banda, por sí solo, no puede volcarlo.

Esta estabilidad se refuerza con la baja tasa del flujo —cuatro vasos cada dieciocho segundos, sin acumulación a presión—, la baja velocidad de la faja, el contacto de los rieles a la altura del centro de gravedad —que limita la inclinación lateral a pocos grados por la escasa holgura entre rieles— y el apoyo mutuo de los vasos dentro del embudo; aguas abajo, el tope de separación entrega los vasos ya singulados, sin colisiones. El único mecanismo que el modelo no captura es una inclinación transitoria en la dirección del flujo durante una colisión dentro del embudo, atenuada por la baja velocidad; es un efecto de segundo orden que no altera la conclusión de estabilidad y que, por completitud, se confirmará mediante un ensayo de banco o una verificación tridimensional puntual (Sección 4.2).



Imagen 3.2. Vista de la simulación de la singulación.

3.1.5 Simulación de Esfuerzos Mecánicos (FEA)

La validación estructural de las piezas críticas se realizó por elementos finitos en dos tipos de estudio: uno estático, que compara el esfuerzo de von Mises máximo con el límite elástico del material para verificar que no haya deformación permanente; y uno modal, que obtiene las frecuencias naturales de la estructura para comprobar que estén lejos del rango de excitación de la estación —cuya cota superior se estima más adelante en esta sección—, evitando la resonancia; D'Imperio et al. (2022) y Grabiec et al. (2022) aplican este criterio en el análisis dinámico de robots cartesianos y paralelos. Los casos de carga corresponden al peor escenario: el carro del pórtico en su máxima extensión, el actuador vertical desplegado y la torre más pesada. La Tabla 3.4 resume los resultados; en el Anexo I se recoge una tabla ampliada con los parámetros y resultados principales de cada estudio (material y límite elástico, esfuerzo de von Mises máximo, desplazamiento máximo y primera frecuencia natural), junto con las condiciones de malla y de borde adoptadas.

Tabla 3.4. Resultados de la simulación por elementos finitos.

Subconjunto	Estudio	σ von Mises máx (MPa)	Desplazamiento máx (mm)	Frecuencia f_1 (Hz)
Pórtico (eje X)	Estático y modal	0,66	0,005	103,0

Cabezal	Modal	—	—	30,9
Mástil del asistente de inserción	Estático y modal	0,39	0,073	8,02
Apilado: torres, trampilla y elevador	Estático y modal	11,6	2,80	24,7
Apilado: poste de ventosas, Coanda y jaula	Estático	4,6	0,106	—

Estimación de la banda de excitación. El rango de frecuencias que excita la estructura se estima a partir de los tiempos de movimiento del estudio de tiempos (Sección 3.1.8) y tiene dos aportes. El primero es la frecuencia fundamental del ciclo, con un ciclo por vaso de 2,95 s (calculado en la Sección 3.1.8):

$$f_0 = \frac{1}{T_c} = \frac{1}{2{,}95\ s} \approx 0{,}34\ Hz \tag{3.14}$$

El segundo proviene de los perfiles de movimiento de los actuadores. De forma conservadora, cada maniobra punto a punto de duración t_m se modela como un ciclo completo de la aceleración (un tramo de arranque y uno de paro), de modo que su frecuencia característica es:

$$f_m = \frac{1}{t_m} \tag{3.15}$$

La maniobra más rápida de la ruta crítica con masa apreciable es la apertura y el cierre de la trampilla, con t_m = 0,20 s, que fija la cota superior de la banda de excitación:

$$f_{exc} = \frac{1}{t_m} = \frac{1}{0{,}20\ s} = 5\ Hz \tag{3.16}$$

El criterio de no resonancia adoptado exige que la primera frecuencia natural supere la cota superior de la banda de excitación por un factor de al menos 1,5, separación en frecuencia habitual para evitar la amplificación dinámica. El modo más bajo del conjunto es el del mástil del asistente de inserción, y su diseño ilustra el papel del análisis modal como herramienta de decisión: el primer cálculo, con el mástil sin arriostrar, arrojó una frecuencia de 6,69 Hz, demasiado próxima a la banda de excitación, lo que motivó incorporar una riostra diagonal que amarra el mástil a la columna estructural del apilado de torres; reejecutado el estudio, la

frecuencia asciende a 8,02 Hz y cumple el criterio. La Imagen 3.3 compara ambos modos, antes y después de la riostra. Con la configuración definitiva:

$$\frac{f_1}{f_{exc}} = \frac{8{,}02\ Hz}{5\ Hz} \approx 1{,}6 \tag{3.17}$$

Este margen se refuerza con el ajuste del tiempo de rampa de los perfiles de movimiento LSPB a un múltiplo del periodo natural de la carga, que cancela la vibración residual (Yoon, 2019; Sección 3.1.8). El indexado del elevador es la maniobra más rápida (0,08 s), con una frecuencia característica cercana a 12,5 Hz; aun así, no gobierna el criterio de resonancia. Su fuerza inercial es pequeña: un paso de unos 15 mm en 0,08 s supone una aceleración pico de aproximadamente 9 m/s² sobre una masa móvil de alrededor de 1,5 kg (plataforma más torre), es decir, unos 14 N, verticales y a lo largo de la columna rígida del elevador. Además —y esto es lo decisivo—, esa fuerza actúa sobre el subconjunto de apilado, cuya primera frecuencia natural es 24,7 Hz, y no sobre el mástil del asistente de inserción (8,02 Hz), que es un bastidor independiente: frente a los 12,5 Hz del indexado, el subconjunto de apilado conserva un margen de 24,7/12,5 ≈ 2,0 veces, por encima del factor mínimo de 1,5 exigido. El mástil, en cambio, solo lo excitan las maniobras horizontales —la apertura de la trampilla (~5 Hz) y el empuje suave del transicionador (~1–2 Hz)—, que fijan en 5 Hz la cota superior de su banda de excitación y preservan su margen de 1,6 veces.

Los esfuerzos máximos son muy inferiores al límite elástico del aluminio (del orden de 215 MPa), por lo que los factores de seguridad son altos —desde unas dieciocho veces en el subconjunto más cargado hasta varios cientos en el resto—. La estructura no está limitada por la resistencia, sino por la rigidez, lo que es deseable porque permite minimizar la masa móvil, como subrayan Hubert et al. (2025). En el análisis modal, todas las frecuencias naturales quedan por encima del rango de excitación: el pórtico alcanza 103,0 Hz y el

subconjunto de apilado 24,7 Hz, mientras que el mástil del asistente de inserción, ya arriostrado contra la columna estructural del apilado de torres, es el elemento más flexible con 8,02 Hz y aun así conserva un margen de 1,6 veces sobre la banda de excitación, por encima del factor mínimo de 1,5 exigido. El subconjunto de apilado presenta el mayor desplazamiento, de 2,80 mm, localizado en los brazos en voladizo que sostienen la trampilla y el elevador; se trata de una flecha elástica: una deformación temporal que desaparece al retirar la carga y que no compromete el material —el esfuerzo está muy por debajo del límite—, constante mientras el equipo está montado, por lo que se compensa durante el montaje. La Imagen 3.3 muestra un resultado representativo.

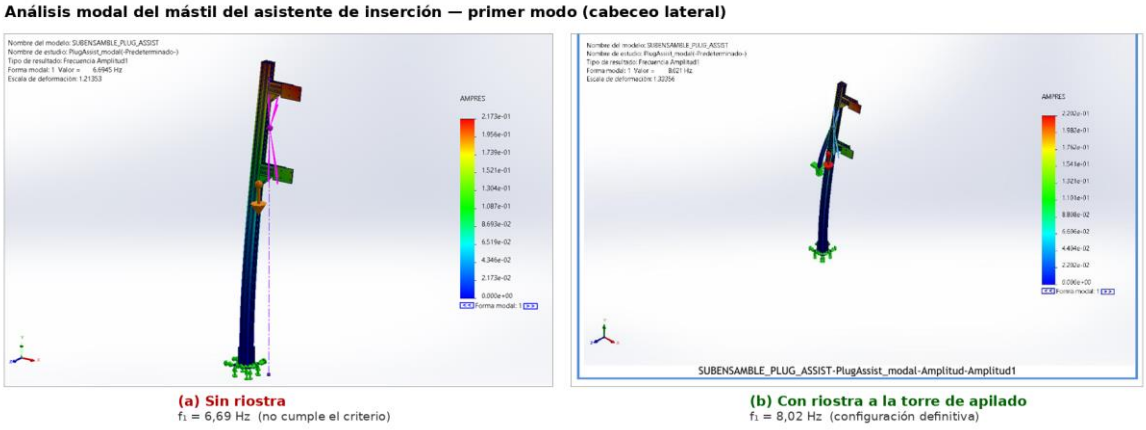


Imagen 3.3. Análisis modal del mástil del asistente de inserción: primer modo sin riostra (a, f_1 = 6,69 Hz) y con riostra a la columna de apilado (b, f_1 = 8,02 Hz).

3.1.6 Sistema de Visión Artificial

El módulo de visión artificial inspecciona el 100 % de los vasos antes de que avancen a la estación de enfundado. Para ello integra cinco cámaras industriales Basler acA1300-60gm: cuatro cámaras laterales posicionadas a 0°, 90°, 180° y 270° alrededor del vaso para la detección del descentrado de la etiqueta IML, y una cámara cenital para la detección de rebaba perimetral. Todas las cámaras comparten el mismo domo de iluminación difusa y se disparan simultáneamente mediante señal de encoder, garantizando la captura sincronizada del vaso en movimiento. La sección describe el diseño de la estación, la selección de componentes, el algoritmo PDI, la sincronización y el protocolo de comunicación.

Diseño de la Estación de Inspección

La estación de inspección integra cinco cámaras industriales en una configuración radial de 360°. Las cuatro cámaras laterales se ubican en los meridianos a 0°, 90°, 180° y 270°, con una inclinación de 43° para enfocar la banda de etiqueta IML del vaso, capturando cada una el 90° de circunferencia que le corresponde para construir una imagen completa del perímetro etiquetado. La cámara cenital se posiciona en el plano superior del domo apuntando hacia la boca del vaso, que es la zona donde aparece la rebaba perimetral. Esta separación de funciones: laterales para etiqueta, cenital para rebaba, permite optimizar el ángulo de iluminación y la profundidad de campo de cada grupo de cámaras de forma independiente.

El domo de iluminación difusa (diámetro interior 160 mm, altura 150 mm) es compartido por las cinco cámaras. Su superficie interior está recubierta con sulfato de bario ($BaSO_4$, $\rho \geq 98\,\%$), que produce una distribución Lambertiana homogénea que ilumina tanto los flancos del vaso —necesarios para la inspección lateral de la etiqueta— como su boca —necesaria para la inspección cenital de rebaba—. Los tres anillos de LEDs a 70°, 45° y 20° respecto a la base aportan iluminación rasante y cenital combinada. El disparo estroboscópico (pulso de 0,5 ms) se aplica simultáneamente a las cinco cámaras mediante un único pulso del encoder, congelando el movimiento del vaso en todos los ángulos a la vez.

La resolución espacial mínima para resolver $\Delta_{min} = 0{,}5$ mm con factor de seguridad de tres píxeles: $N_{px} = (FOV / \Delta_{min}) \times 3 = (130 / 0{,}5) \times 3 = 780$ px. El sensor de 1 280 px cubre esa exigencia con factor 1,64, entregando 0,102 mm/px. La Tabla 3.5 resume la configuración completa de la estación.

Tabla 3.5. Parámetros de diseño de la estación de inspección (5 cámaras).

Parámetro	**Valor**
Número total de cámaras	5 × Basler acA1300-60gm
Cámaras laterales (detección IML)	4 unidades — posiciones 0°, 90°, 180°, 270°
Cámara cenital (detección rebaba)	1 unidad — posición superior (0° elevación)

Parámetro	Valor
Función cámaras laterales	Inspección de desalineamiento de etiqueta IML ($\varepsilon\_Hu > 3$ %)
Función cámara cenital	Detección de rebaba perimetral ($\Delta R > 1{,}2$ mm)
Diámetro interior del domo	160 mm
Altura del domo	150 mm
Recubrimiento interior	$BaSO_4$ (reflectancia $\rho \geq 98$ %) — compartido para las 5 cámaras
Anillos LED (ángulo desde la base)	3 anillos: 70°, 45°, 20°
Modo de disparo	Estroboscópico — pulso de 0,5 ms, disparo simultáneo a las 5 cámaras
Resolución del sensor	1 280 × 1 024 px (1,31 Mpx, CMOS mono) — por cámara
Velocidad máxima	60 fps — por cámara
Interfaz de comunicación	GigE Vision (IEEE 802.3ab) — switch industrial dedicado
Distancia de trabajo	300 mm (cámaras laterales y cenital)
Campo de visión (FOV) lateral	~130 mm × 133 mm por cámara (cubre 90° de la circunferencia)
Resolución espacial	0,102 mm/px
Píxeles mínimos requeridos (N_px_min)	780 px (= FOV / Δ_min × 3)
Factor de seguridad del sensor	1,64 (1 280 / 780)

Selección de Componentes

Las tres cámaras candidatas comparten el mismo sensor base (e2v EV76C560 CMOS, 1/1,8", 5,30 µm de píxel), por lo que los diferenciadores son la velocidad máxima de captura, el ecosistema de software y el costo. La Tabla 3.6 presenta las especificaciones técnicas reales; la Tabla 3.7 aplica la matriz de decisión ponderada. La selección recae sobre cinco unidades del modelo ganador para cubrir las cuatro posiciones laterales y la posición cenital.

Tabla 3.6. Especificaciones técnicas comparadas de cámaras candidatas.

Especificación	Basler acA1300-60gm	Allied Vision Mako G-131	IDS UI-3240CP-M-GL
Sensor	e2v EV76C560 CMOS	e2v EV76C560 CMOS	e2v EV76C560 CMOS
Resolución	1 280 × 1 024 px	1 280 × 1 024 px	1 280 × 1 024 px
Megapíxeles	1,31 Mpx	1,31 Mpx	1,31 Mpx
Velocidad máxima	60 fps	62 fps	60 fps
Tamaño de píxel	5,30 µm × 5,30 µm	5,30 µm × 5,30 µm	5,30 µm × 5,30 µm
Tamaño del sensor	1/1,8"	1/1,8"	1/1,8"
Tipo de obturador	Global / de barrido	Global / de barrido	Global / de barrido
Interfaz	GigE Vision (IEEE 802.3ab)	GigE Vision + PoE (802.3af)	GigE Vision (IEEE 802.3ab)
SDK principal	pylon 6 + pypylon / OpenCV	Vimba 6 + pymba / GenICam	IDS peak + uEye API
Temperatura de operación	0 – 50 °C	0 – 50 °C	0 – 50 °C
Precio referencial (USD)	~ 450 (× 5 uds. = 2 250)	~ 620 (× 5 uds. = 3 100)	~ 380 (× 5 uds. = 1 900)

Tabla 3.7. Matriz de decisión ponderada para selección de cámara industrial.

Criterio	Peso	Basler acA1300-60gm	Allied Vision Mako G-131	IDS UI-3240CP-M-GL
Resolución	0,25	9 → 2,25	9 → 2,25	9 → 2,25
Velocidad (fps)	0,20	9 → 1,80	9 → 1,80	9 → 1,80
Interfaz GigE	0,15	9 → 1,35	9 → 1,35	9 → 1,35

Criterio	Peso	Basler acA1300-60gm	Allied Vision Mako G-131	IDS UI-3240CP-M-GL
Compat. SDK/OpenCV	0,20	9 → 1,80	8 → 1,60	7 → 1,40
Costo relativo	0,10	8 → 0,80	7 → 0,70	9 → 0,90
Soporte técnico	0,10	9 → 0,90	8 → 0,80	8 → 0,80
Puntuación total	1,00	8,90	8,50	8,50

La Basler acA1300-60gm obtiene la mayor puntuación (8,90/10) y se seleccionan cinco unidades (coste referencial ~2 250 USD). Su SDK pylon 6 con bindings pypylon permite lanzar cinco hilos de captura independientes en el IPC Advantech MIC-770V3 (Intel Core i7-9700E, 8 núcleos), procesando en paralelo las imágenes de las cuatro cámaras laterales y la cenital sin cuellos de botella.

Para la cuña en el cilindro de descarte se evaluaron cuatro materiales (Tabla 3.8). Se seleccionó PA66 ($\mu = 0,32$, dureza 80R Rockwell, buena resistencia química al PP).

Tabla 3.8. Comparativa de materiales para la cuña del cilindro de descarte.

Material	Dureza	μ (acero seco)	Resist. química PP	Seleccionado
PTFE	55D Shore	0,05	Alta	No
PA66	80R Rockwell	0,32	Media-alta	Sí ✓
POM	82R Rockwell	0,25	Media	No
PU 90A	90A Shore	0,55	Media	No

La lógica de clasificación completa queda en la tabla de verdad (Tabla 3.9). El umbral $\varepsilon_{Hu} = 3$ % corresponde a $2,7\sigma$ de la distribución estadística de vasos conformes ($\sigma_{Hu} \approx 0,8$ %), equilibrando sensibilidad y falsos rechazos. El veredicto sobre la etiqueta se obtiene por consenso de las cuatro cámaras laterales: basta que una sola supere $\varepsilon_{Hu} > 3$ % para activar el cilindro de descarte 1.

Tabla 3.9. Tabla de verdad del sistema de clasificación PDI.

Canny (contorno)	**ε_Hu (≥ 1 cámara lat.)**	**ΔR (cámara cenital)**	**Diagnóstico**	**Actuación**
OK	≤ 3 %	≤ 1,2 mm	Conforme	Ninguna
OK	> 3 %	≤ 1,2 mm	Etiqueta descentrada	Cilindro de descarte 1
OK	≤ 3 %	> 1,2 mm	Rebaba perimetral	Cilindro de descarte 2
OK	> 3 %	> 1,2 mm	Doble defecto	Cilindro de descarte 1
Error (≥1 cam.)	—	—	Falla de adquisición	Parada supervisada

Flujo de Procesamiento Digital de Imagen

El IPC ejecuta cinco hilos de procesamiento en paralelo: uno por cámara sobre OpenCV 4.x (Ubuntu 22.04, Python 3.10). Cada hilo recibe su fotograma capturado de forma sincronizada y aplica el PDI correspondiente a su función.

Cámaras laterales (0°, 90°, 180°, 270°) : Detección de descentrado de la etiqueta IML. Etapa 1: umbralización adaptativa de Canny con $T_{high} = \mu_G + 2\sigma_G$ y $T_{low} = \mu_G - 0{,}5\sigma_G$, calculados sobre el histograma de la ROI de cada imagen. Etapa 2: momentos invariantes de Hu φ_1–φ_7 comparados contra el patrón de referencia. Criterio de rechazo: $\varepsilon_{Hu} = (1/7)\ \Sigma_i\ |\log|\varphi_i| - \log|\varphi_{i\_ref}|| > 3$ % en cualquiera de las cuatro vistas (Maślanka et al., 2025). La cobertura angular de 4 × 90° garantiza que un descentrado en cualquier posición de la circunferencia sea detectado por al menos una cámara.

Cámara cenital : Detección de rebaba perimetral.

Etapa 1: mismo detector de Canny adaptativo sobre la ROI del borde superior del vaso (Rotter et al., 2024). Etapa 2: comprobación cromática del canal rojo; desviación $\Delta R > 1{,}2$ mm respecto al perfil nominal del borde indica rebaba de material excedente y activa el cilindro de descarte 2. El procesamiento cenital se realiza en paralelo con las cuatro laterales, sin penalización temporal adicional gracias a los 8 núcleos del i7-9700E.

Presupuesto de tiempos. Las cinco cámaras se disparan simultáneamente: T_adq = 11,5 ms (adquisición en paralelo). El PDI de los cinco hilos se solapa en el IPC multi-core: T_PDI ≈ 22,0 ms (mayor que la versión monócámara por sobrecarga de planificación de tareas). La comunicación Modbus TCP permanece igual: T_comm = 6,0 ms. Total: T_total = 11,5 + 22,0 + 6,0 = 39,5 ms por ciclo de cuatro vasos, representando el 0,88 % del takt de 4 500 ms. La inspección sigue sin constituir cuello de botella.

Sincronización encoder–cilindro de descarte

El encoder Hengstler RI58-O (1 024 ppr, polea D = 50 mm) genera el pulso de disparo que activa simultáneamente las cinco cámaras. Con distancia cámara–cilindro de descarte d_cam-kick = 200 mm el retardo en pulsos es: $\Delta P_{kick} = (200 / (\pi \times 50)) \times 1\,024 = 1\,304$ pulsos. A v = 67 mm/s: f ≈ 437 Hz → t_retardo ≈ 2 984 ms (dentro del takt de 4 500 ms). El módulo HSC del PLC S7-1200 gestiona el conteo sin pérdida de pulsos.

Comunicación y Protocolo Modbus TCP

El IPC consolida los veredictos de las cinco cámaras en un único resultado por vaso (conforme / rebaba / etiqueta / doble defecto) y lo escribe en los registros Modbus TCP HR0–HR3. El mapa de registros permanece igual al definido previamente (Tabla 3.10), ya que el protocolo encapsula el veredicto final independientemente del número de cámaras que participaron en él. La latencia total de la transacción Modbus es T_comm = 6,0 ms, sobre una VLAN dedicada (ID 10) en el switch Siemens SCALANCE X208.

Tabla 3.10. Mapa de registros Modbus TCP — módulo de visión artificial.

Registro	**Descripción**	**Valores posibles**
HR0	Estado del vaso 1	0 = conforme | 1 = rebaba | 2 = etiqueta
HR1	Estado del vaso 2	0 = conforme | 1 = rebaba | 2 = etiqueta
HR2	Estado del vaso 3	0 = conforme | 1 = rebaba | 2 = etiqueta
HR3	Estado del vaso 4	0 = conforme | 1 = rebaba | 2 = etiqueta

Registro	Descripción	Valores posibles
HR4	Contador de ciclos inspeccionados	0–65 535 (reset manual por turno)
HR5	Contador de rechazos del cilindro de descarte 1	0–65 535 (acumulado por turno)
HR6	Contador de rechazos del cilindro de descarte 2	0–65 535 (acumulado por turno)
HR7	Bit de dato listo	0 = en proceso | 1 = leer HR0–HR3

Esta red Modbus TCP es independiente del tráfico PROFINET de los servomotores, de modo que la inspección y el control de movimiento no compiten por el mismo medio y ambos conservan su determinismo.

Prueba de Concepto — Validación Funcional del Algoritmo

Con el fin de verificar el funcionamiento del algoritmo PDI antes de la integración del hardware industrial, se realizó una prueba de concepto con una única cámara convencional Logitech BRIO 100 (USB 2.0, 1 080p, 30 fps), representando una de las cuatro vistas laterales del sistema definitivo. La prueba valida la lógica del algoritmo en condiciones de laboratorio, no las prestaciones del sistema completo de cinco cámaras. La Tabla 3.11 compara las características técnicas de ambas plataformas; la Tabla 3.12 resume los resultados indicativos obtenidos.

Tabla 3.11. Comparativa entre cámara de prueba y cámara industrial de implementación.

Parámetro	Logitech BRIO 100 (Prueba)	Basler acA1300-60gm (Industrial)
Tipo de dispositivo	Webcam de consumo	Cámara industrial GigE
Sensor	CMOS 2 Mpx (consumo)	e2v EV76C560 CMOS (industrial)
Resolución	1 920 × 1 080 px	1 280 × 1 024 px
Velocidad máxima	30 fps	60 fps
Tamaño de píxel	~2,8 µm (estimado)	5,30 µm
Tipo de obturador	de barrido (fijo)	Global / de barrido

Parámetro	Logitech BRIO 100 (Prueba)	Basler acA1300-60gm (Industrial)
Interfaz	USB 2.0 Tipo-A	GigE Vision (IEEE 802.3ab)
Disparo externo (por hardware)	No disponible	Sí (señal hardware < 1 ms)
Sincronización con encoder	No (solo por software)	Sí (línea de disparo dedicada)
Iluminación estroboscópica	No compatible	Sí (salida estroboscópica)
SDK / driver	UVC genérico (conexión directa)	pylon 6 + pypylon + OpenCV
Precio referencial	~35 USD (1 unidad)	~450 USD/u × 5 uds. = ~2 250 USD
Rol en el proyecto	Representación del algoritmo PDI (1 vista lateral) (1 vista cenital)	4 vistas laterales + 1 cenital

Tabla 3.12. Resultados indicativos de la prueba de concepto con cámara convencional.

Parámetro de evaluación	Resultado
Configuración de prueba	1 cámara Logitech BRIO 100 (representación del algoritmo)
Total de vasos inspeccionados	30 unidades
Vasos conformes en la muestra	20 unidades (66,7 %)
Vasos con rebaba perimetral	6 unidades (20,0 %)
Vasos con etiqueta descentrada (IML)	4 unidades (13,3 %)
Conformes clasificados correctamente	17 / 20 (85,0 %)
Rebabas detectadas correctamente	4 / 6 (66.7%)
Etiquetas descentradas detectadas	3 / 4 (75,0 %)
Total de clasificaciones correctas	24 / 30 (80 %)

Parámetro de evaluación	Resultado
Falsos positivos (conformes rechazados)	3 / 20 (15,0 %)
Falsos negativos (defectos no detectados)	3 / 10 (30,0 %)
Tiempo promedio de proc. por vaso	~85 ms (1 cámara estática, sin encoder)
Condiciones de iluminación	Luz natural + LED de escritorio (no controlada)
Modo de captura	Estático (posicionamiento manual del vaso)
Plataforma	OpenCV 4.x, Python 3.10, Ubuntu 22.04
Nota	Prueba con 1 cámara lateral. Sistema definitivo usa 4 laterales + 1 cenital simultáneas.

Nota: Valores indicativos obtenidos con 1 cámara en condiciones de laboratorio (iluminación no controlada, captura estática). La implementación definitiva con 5 × Basler acA1300-60gm, domo $BaSO_4$ y disparo simultáneo por encoder permite reducir la tasa de falsos positivos (15 % → < 3 % esperado) y falsos negativos (30 % → < 5 % esperado), al eliminar las variables de iluminación no controlada y desalineamiento de posición del vaso.

3.1.7 Arquitectura de Control y Seguridad

El sistema se gobierna con un controlador lógico programable (PLC) Siemens S7-1200, CPU 1214C, que coordina la secuencia bajo una lógica de operación continua: prioriza no detener la inyectora, de modo que los rechazos de la inspección y las demoras del encajado se absorben sin frenar el ciclo de inyección. La lógica se diseñó como un GRAFCET de tres ramas que operan de forma concurrente —transporte e inspección, embolsado y apilado, y encajado—, más una etapa inicial de configuración por receta; las ramas se sincronizan mediante banderas. Como la CPU 1214C no admite el lenguaje gráfico secuencial nativo, el GRAFCET se implementa como un secuenciador en diagrama de contactos (Ladder) dentro del entorno TIA Portal, con una sola etapa activa por rama gobernada por instrucciones de activación y desactivación. El programa se desarrolló en diagrama de contactos y se presenta

en el Anexo C, y se validó en lazo cerrado de software (SITL) con PLCSIM, como se documenta en el Anexo H: compila sin errores ni advertencias, se ejecuta en la CPU emulada en estado RUN, y el monitoreo en línea (Imagen 3.4) confirma que las tres ramas concurrentes sincronizan mediante banderas sin bloqueo y que el supervisor de seguridad ejecuta sus transiciones de arranque y de parada segura. La realimentación de la planta se emula con un bloque de simulación interno que reproduce los tiempos del estudio de movimiento. El GRAFCET de control completo se incluye en el Anexo B.

La comunicación entre el PLC, los cinco drives de los servomotores y la interfaz se canaliza por una red industrial PROFINET, que aporta el determinismo necesario para que las transiciones no introduzcan retardos perjudiciales al tiempo de ciclo (Zhang & Wang, 2025); el enlace con la inyectora se resuelve con una señal de fin de ciclo que dispara la secuencia. El panel de operador (HMI) permite seleccionar el formato y los parámetros de receta —número de vasos por torre, cupo de torres por caja y vasos reservados para la reinserción de los reparados— sin modificar el programa. El mapa completo de señales se incluye en el Anexo D, y el cableado de entradas y salidas y la distribución de 24 V CC, en el Anexo F.

El módulo de visión entrega su veredicto al PLC mediante el protocolo Modbus TCP sobre una red local dedicada, independiente del tráfico de los servomotores; el mapa de registros y la latencia de esta comunicación se detallan en la Sección 3.1.6.

En cuanto a la seguridad, la integridad reside en el hardware: una seta de parada de emergencia y una cortina de luz actúan sobre un relé de seguridad que retira el par de los cinco drives —función de par seguro desconectado (STO)— y lleva el aire a un estado seguro. Sobre esa base, el PLC ejecuta un GRAFCET supervisor que lee la cadena de seguridad, congela las tres ramas de producción y conduce el rearranque con arranque suave. El paro ante un evento no planificado es de categoría 1 —desaceleración controlada y luego retiro del par—, con freno gobernado en los ejes verticales para que la carga no caiga y con el escape de aire dispuesto de modo que el cabezal mantenga sujeta la torre. El acceso del operario para el cambio de caja se realiza con la celda en estado seguro y exige un rearme manual; el rearranque nunca es automático. El diseño sigue los principios de las normas ISO 12100, ISO 13850, ISO 13849-1 e ISO 14118.

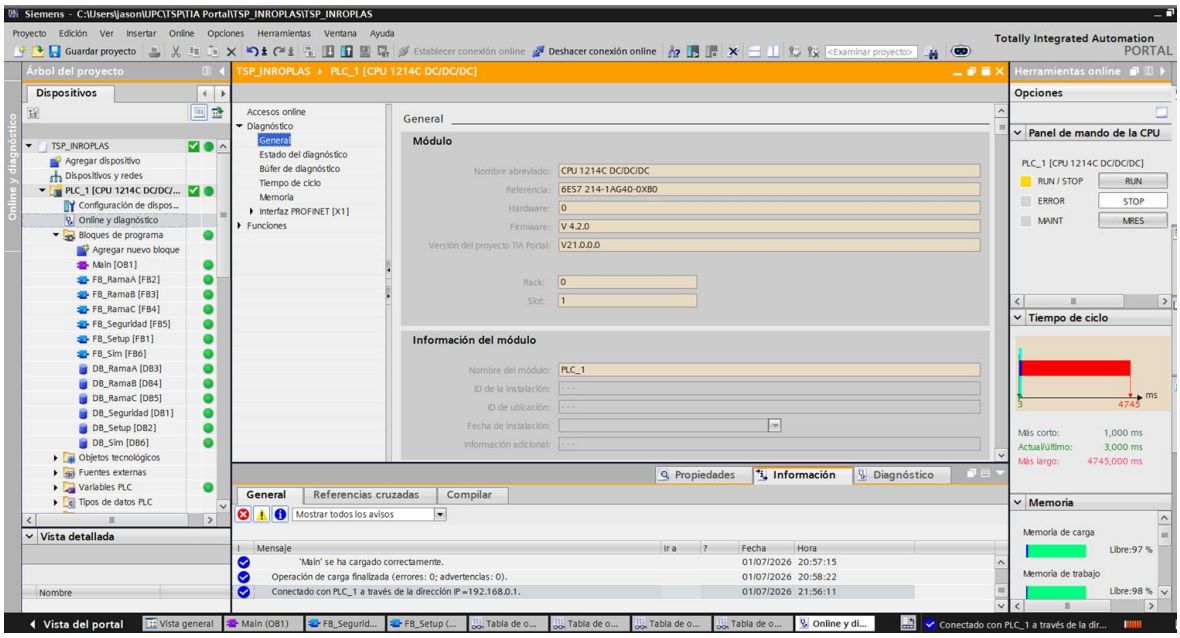


Imagen 3.4. Validación en lazo cerrado de software: monitoreo en línea del programa de control y del supervisor de seguridad en PLCSIM.

3.1.8 Validación Cinemática y Estudio de Tiempos

El ritmo de la línea lo fija la inyectora, que entrega cuatro vasos cada dieciocho segundos como mínimo, lo que equivale a un takt de 4,5 segundos por vaso. Para operar con holgura frente a microparos y variaciones, se adopta como objetivo de robustez un ciclo no mayor a 3,6 segundos por vaso. Este valor corresponde al 80 % del takt: reservar un 20 % de margen permite absorber microparos, rechazos de la inspección y la maniobra de cambio de caja, y aun así igualar la cadencia de la inyectora. Conviene distinguir dos magnitudes que no deben confundirse: la cadencia —el tiempo de ciclo de la estación crítica, que fija el throughput de la célula— y la latencia total del vaso de extremo a extremo, que incluye además el transporte por la faja y la espera hasta completar la torre; esta última es mayor, pero no limita el throughput porque las tres ramas operan en paralelo (Imagen 3.5b).

Este objetivo se obtiene aplicando un factor de utilización del 80 % al takt de la línea:

$$t_{obj} = 0{,}80 \cdot 4{,}5\ s = 3{,}6\ s \tag{3.18}$$

La estación crítica del ciclo es la de embolsado y apilado, porque las tres ramas comparten la trampilla como recurso común. Las velocidades empleadas en el cálculo del ciclo provienen de la documentación de catálogo de los actuadores seleccionados (Festo). Con el

asistente de inserción servo-eléctrico de husillo rápido operando en tres fases, y con los actuadores neumáticos a 6 bar —presión disponible en planta y que asegura que el empuje del transicionador no proyecte el vaso—, el análisis del tiempo de ciclo arroja un valor de la estación crítica de aproximadamente 2,95 segundos por vaso. Este resultado queda por debajo del objetivo de 3,6 segundos y del takt de 4,5 segundos, de modo que el sistema sostiene la cadencia de la inyectora; la capacidad de la célula, cercana a 1220 vasos por hora, supera los 800 vasos por hora de la inyectora. El programa de control se validó en lazo cerrado de software (Sección 3.1.7 y Anexo H); como en esa simulación los tiempos de los actuadores se emulan a partir del presente estudio, el tiempo de ciclo se mantiene como resultado analítico, y su medición independiente mediante un modelo dinámico de la planta queda como refinamiento futuro.

Que la estación crítica sea esta —y no otra— se comprueba comparando el tiempo por vaso de cada estación (Tabla 3.13). La recepción y singulación entregan un vaso cada segundo aproximadamente —el ciclo del tope de separación—, con un 100 % de singulación y sin atascos, según se valida en la Sección 3.1.4; la inspección resuelve en decenas de milisegundos; el transicionador consume unos dos segundos aun sin aprovechar el solapamiento, de los cuales solo 1,04 s caen en la ruta crítica; y el encajado, que actúa una vez por torre, dispone de decenas de segundos por vaso. Ninguna alcanza los 2,95 s del embolsado y apilado, que además es el único recurso compartido en serie —la trampilla—; por tanto, fija el ritmo de la célula.

Tabla 3.13. Tiempo por vaso de cada estación frente a la estación crítica.

Estación (rama)	**Tiempo por vaso**	**¿Limita el ciclo?**
Recepción y singulación (A)	~1 s (ciclo del tope; 100 % en fila, sin atascos)	No
Inspección (A)	~0,04 s	No
Transicionador (A→B)	~2 s (1,04 s en la ruta crítica)	No
Embolsado y apilado (B)	2,95 s	Sí
Encajado (C)	~0,8 s/vaso (una vez por torre)	No

Ciclo de la estación crítica. El ciclo por vaso es la suma de los tramos en serie sobre la trampilla (ruta crítica), tomados del estudio de tiempos:

$$t_{ciclo} = 0{,}52 + 0{,}52 + 0{,}20 + 0{,}59 + 0{,}25 + 0{,}59 + 0{,}30 \approx 2{,}97\ s \qquad (3.19)$$

Los tramos son el empuje y la retracción del transicionador, la apertura de la trampilla, el descenso del asistente de inserción, la pausa de rotura (dwell), el ascenso del asistente de inserción y el peinado del faldón con el anillo Coanda. Cada tramo se informa redondeado a centésimas, por lo que su suma directa da 2,97 s; sumados sin redondeo intermedio, esos mismos tramos dan 2,95 s, valor que se adopta como resultado de diseño, ya que el redondeo de cada tramo infla ligeramente la suma directa. Añadiendo el sobrecosto por torre, repartido entre los vasos, el ciclo efectivo es ≈ 3,0 s.

Seguridad del vaso. La presión se fija en 6 bar y el empuje del transicionador se opera con aceleración suave para que el vaso no vuelque. El umbral de vuelco depende solo de la geometría del vaso (la masa se cancela):

$$a_{vuelco} = g \cdot \frac{r_{base}}{h_{empuje}} \approx 4\ m/s^2 \qquad (3.20)$$

Operando el empuje a ~3 m/s² (aceleración de operación), el factor de seguridad frente al vuelco es el cociente entre el umbral (4 m/s²) y la operación (3 m/s²):

$$FS = \frac{4}{3} \approx 1{,}4 \qquad (3.21)$$

Capacidad de la célula. A partir del ciclo por vaso y del molde de cuatro cavidades cada 18 s:

$$C_{célula} = \frac{3600\ s/h}{2{,}95\ s} \approx 1220\ vasos/h \qquad (3.22)$$

$$C_{inyectora} = \frac{4\ vasos}{18\ s} \cdot 3600\ s/h = 800\ vasos/h \qquad (3.23)$$

El estudio confirma, además, que la inspección por visión no condiciona el ciclo: su tiempo de procesamiento es una fracción mínima del takt (Sección 3.1.6).

Cada eje del pórtico ejecuta un perfil LSPB cuyo tiempo de rampa se sintoniza a un múltiplo del periodo natural de la torre, de modo que la vibración residual se cancela sin sensores adicionales (Yoon, 2019): el tiempo de aceleración se ajusta según $t_b = k\,T_n$, donde t_b es el tiempo de rampa, en segundos; T_n es el periodo natural de la carga, en segundos; y k es un número entero. La Imagen 3.5 presenta el ciclograma de la estación crítica.

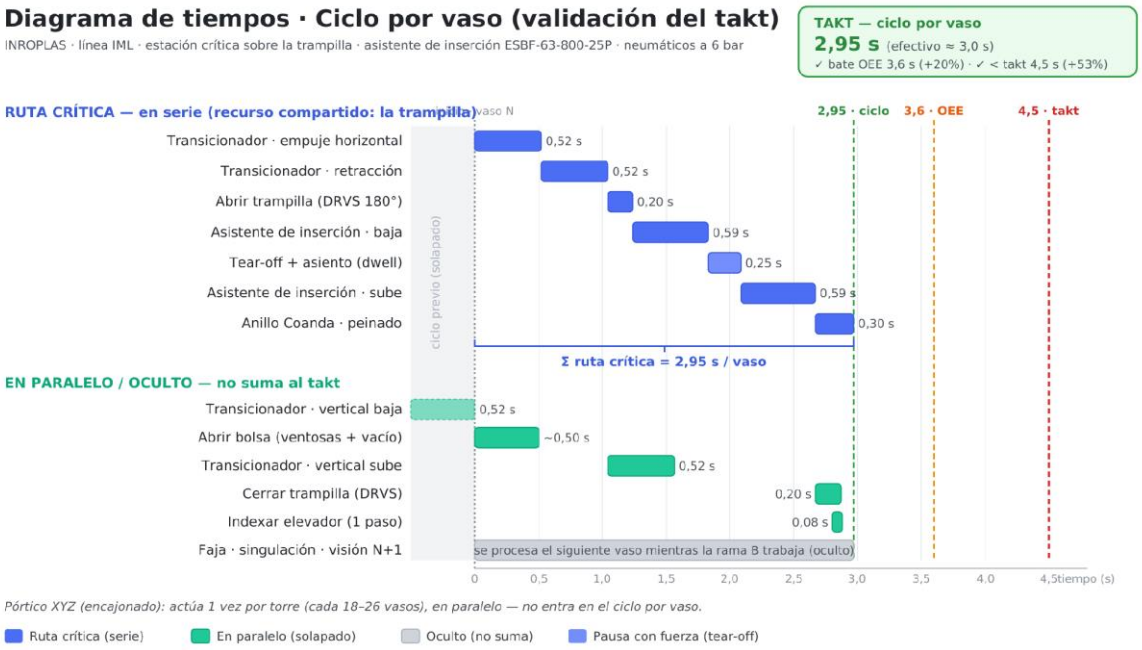
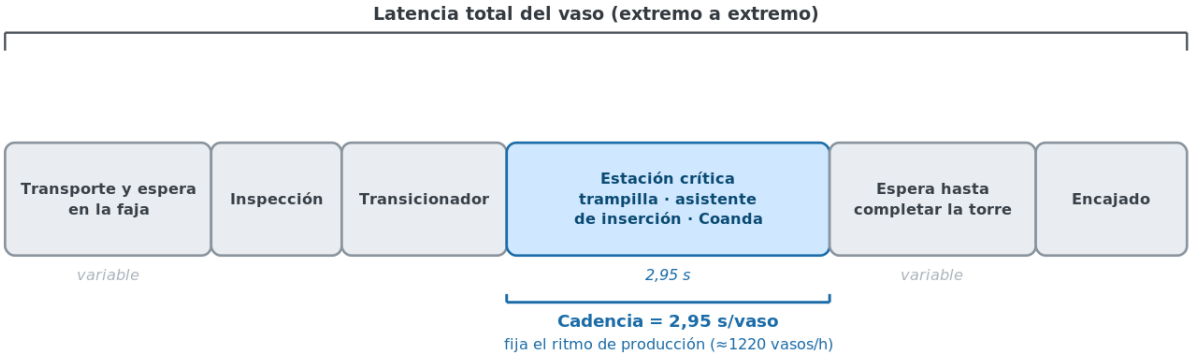


Imagen 3.5. Ciclograma de la estación crítica, con las líneas del takt (4,5 s) y del objetivo de robustez (3,6 s).

Imagen 3.5b — Cadencia frente a latencia total del vaso



Solo la estación crítica (2,95 s) fija el ritmo de la célula: es el recurso en serie (la trampilla). Los tramos de transporte y de espera de torre son mayores, pero se solapan entre vasos —las tres ramas operan en paralelo— y no limitan el ritmo de producción.

Imagen 3.5b. Distinción entre la cadencia (ciclo de la estación crítica, 2,95 s) y la latencia total del vaso de extremo a extremo.

3.1.9 Diagrama de Bloques de Flujo del Proceso

El diagrama de bloques de flujo del proceso (Block Flow Diagram, BFD) ofrece una vista global del sistema: representa cada estación como un bloque funcional y traza el recorrido del producto, desde la entrega de los vasos por la inyectora IML hasta la caja terminada, con la ramificación de descarte en la estación de inspección —falla de etiqueta a molienda, falla de rebaba a reparación manual—. Sintetiza la arquitectura de la Sección 3.1.2 y enmarca la lógica de control de la Sección 3.1.7. La Imagen 3.6 presenta el diagrama.

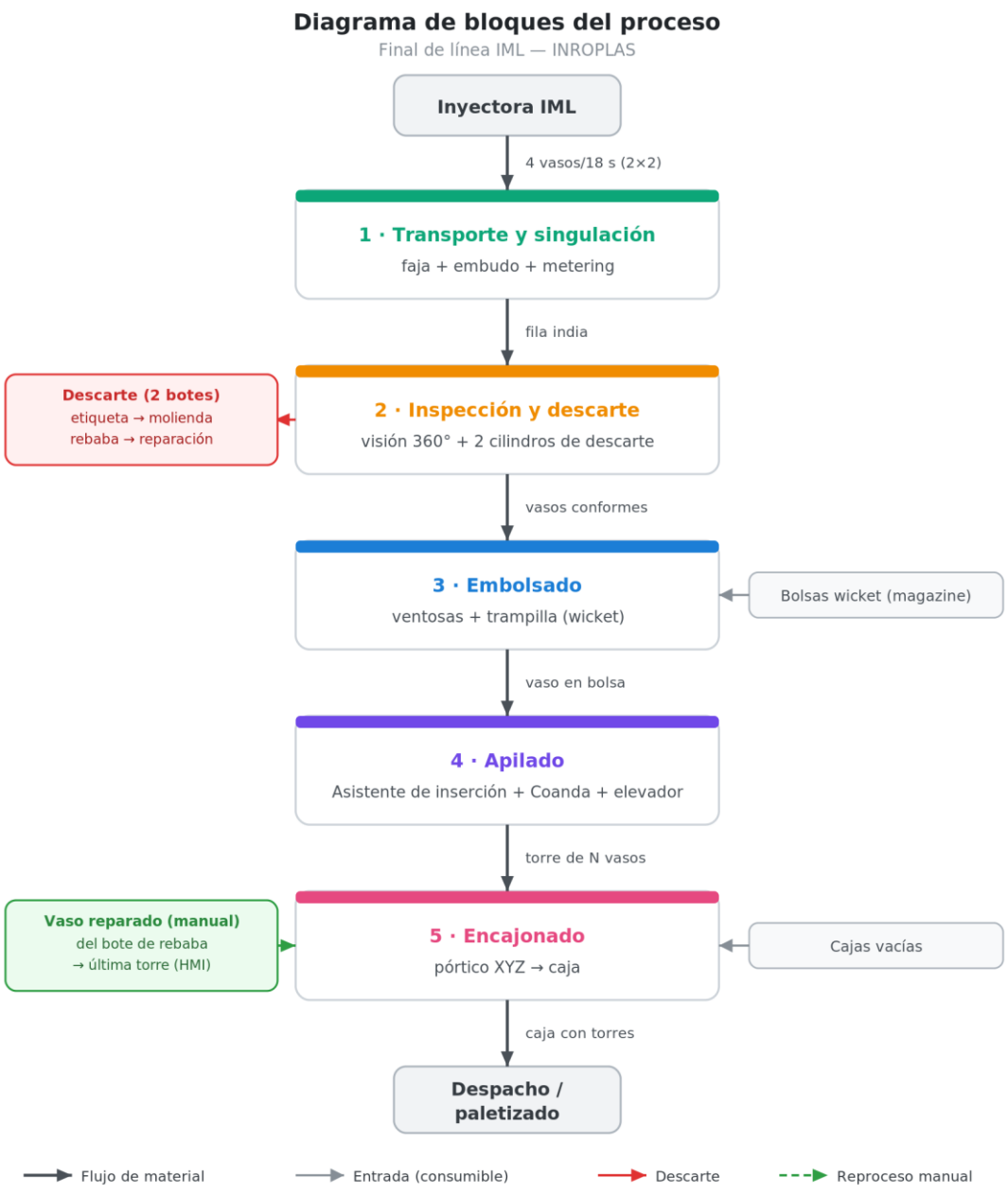


Imagen 3.6. Diagrama de bloques de flujo del proceso.

3.2 Resultados Esperados y Obtenidos

3.2.1 Análisis del Impacto Económico

La justificación económica de la automatización se sustenta en la reducción del personal del final de línea. El estudio de tiempos realizado en planta (Tabla 3.14) muestra que el contenido de trabajo manual es de aproximadamente 19 segundos por vaso, lo que exige unos cinco operarios por turno para seguir la cadencia de la inyectora; se adopta cinco como

valor representativo del rango de cuatro a seis operarios observado en planta. El sistema automatizado lleva esa dotación a un único supervisor.

Tabla 3.14. Tiempos referenciales de las tareas manuales por vaso.

Tarea manual	Tiempo referencial (s)
Inspección de etiqueta y rebaba	7,0
Embolsado individual	8,0
Apilado en torre	2,5
Encajado (prorrateado por vaso)	1,5
Total	≈ 19,0

Estos tiempos se consideran referenciales: cuando una persona sabe que está siendo observada tiende a trabajar más rápido o con más cautela, por lo que los valores medidos se utilizan como orden de magnitud y no como medición de precisión.

Para estimar el ahorro de forma conservadora se valora cada operario retirado al monto más bajo posible: la Remuneración Mínima Vital, que en el Perú asciende a S/ 1130 mensuales. Considerando las catorce remuneraciones anuales que fija la ley —doce mensualidades más dos gratificaciones—, el costo laboral mínimo de un operario es de unos S/ 15 820 al año; al incorporar los aportes de ley del empleador —el seguro de salud, la bonificación afecta a las gratificaciones y la compensación por tiempo de servicios— ese costo asciende a unos S/ 18 600 al año, equivalente a 16,4 remuneraciones mensuales. La línea opera en dos turnos, de modo que la dotación pasa de diez operarios —cinco por turno— a dos supervisores —uno por turno—. Como el supervisor, por su mayor calificación, percibe una remuneración un 50 % mayor que la del operario (el mismo criterio de la Sección 3.2.2), el ahorro no se calcula como ocho puestos retirados, sino como la diferencia entre el costo laboral de la línea antes y después de la automatización.

Valorando el personal con las cargas de ley, el costo laboral anual de la línea pasa de unos S/ 186 000 (diez operarios) a unos S/ 55 800 (dos supervisores), un ahorro recurrente de S/ 130 200 al año; valorado todo al piso de la Remuneración Mínima Vital, ese costo pasa de S/ 158 200 a S/ 47 460 y el ahorro es de S/ 110 700 al año. La viabilidad, sin embargo, no se sostiene solo en este ahorro: debe contrastarse con la inversión necesaria.

Como el proyecto aún no cuenta con cotizaciones en firme, el presupuesto se elabora como una estimación de orden de magnitud —clase 4 según la clasificación de estimaciones de costo de la AACE, con una exactitud esperada de ±30 a 50 %—, a partir de los precios referenciales de catálogo de los componentes de la lista de materiales (Anexo A) y de factores porcentuales para los rubros que no se cotizan por unidad. Las fuentes de los precios y la justificación de cada porcentaje se detallan en el Anexo G. La Tabla 3.15 resume la inversión inicial agrupada por rubros.

Tabla 3.15. Presupuesto de inversión referencial (CAPEX) por rubros, en soles.

Rubro	**Monto referencial (S/)**
Accionamiento y movimiento (ejes, servomotores y servo-drives)	102 400
Neumática y vacío	23 300
Transporte (faja de acople)	12 000
Control, eléctrico y seguridad (gabinete)	30 600
Visión artificial	22 900
Piezas a medida, fabricación y perfilería estructural	30 800
Subtotal equipos	222 000
Integración y puesta en marcha (30 % del equipo)	66 600
Flete y nacionalización (10 % de lo importado)	18 400
Contingencia (15 %)	46 100
Inversión total (CAPEX)	353 100

Los componentes comerciales son de procedencia importada; al tratarse de bienes de capital, el arancel aplicable en el Perú es de 0 %, por lo que el rubro de importación recoge únicamente el flete y los gastos de nacionalización. La integración y la puesta en marcha se estiman en un 30 % del valor del equipo, en el extremo inferior del rango que reporta la práctica de integración de sistemas (entre 30 y 50 % del costo total del proyecto), porque la ingeniería de detalle es el entregable del presente trabajo y no se terceriza. El impuesto general a las ventas no se incluye en la base de inversión por constituir crédito fiscal recuperable para la empresa.

El sistema automatizado introduce un costo de operación anual que debe restarse del ahorro: el consumo eléctrico de los servomotores y de la neumática, estimado en unos S/ 6700 al año (cuatro kilovatios promedio durante dos turnos), y el mantenimiento, estimado en un 4 % del valor del equipo —dentro del estándar de 2 a 5 % del valor de reposición que reporta la práctica de mantenimiento industrial—, unos S/ 8900 al año. El costo de operación incremental suma del orden de S/ 15 600 al año. Los consumibles (las bolsas y las cajas) no varían entre la operación manual y la automatizada, por lo que no afectan el resultado diferencial.

Con la inversión, el ahorro y el costo de operación se evalúa el retorno mediante tres indicadores. El periodo de recuperación es el tiempo en que el beneficio neto acumulado iguala la inversión; el Valor Actual Neto (VAN) descuenta los flujos futuros a una tasa que representa el costo de oportunidad del capital; y la Tasa Interna de Retorno (TIR) es la tasa que anula el VAN:

$$PR = \frac{I_0}{FN} \tag{3.24}$$

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{FN_t}{(1+i)^t} \tag{3.25}$$

$$-I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{FN_t}{(1+TIR)^t} = 0 \tag{3.26}$$

donde I_0 es la inversión inicial; FN, el flujo neto anual (el ahorro menos el costo de operación incremental); i, la tasa de descuento, adoptada en 12 % anual —valor prudente, superior al costo de oportunidad del capital que el Ministerio de Economía y Finanzas aplica a los proyectos públicos (9 %)—; y n, la vida útil del equipo, tomada en 10 años. La Tabla 3.16 presenta el resultado en dos escenarios: uno base, que valora el personal con las cargas de ley, y uno conservador, que lo valora al piso de la Remuneración Mínima Vital. Ambos se calculan sobre la inversión total.

Tabla 3.16. Evaluación del retorno de la inversión, en soles.

Indicador	**Caso base (con cargas)**	**Caso conservador (piso)**
Inversión inicial (CAPEX)	353 100	353 100
Ahorro bruto anual	130 200	110 700

Costo de operación incremental	(15 600)	(15 600)
Beneficio neto anual	114 600	95 100
Periodo de recuperación	**3,1 años**	**3,7 años**
Valor Actual Neto (12 %, 10 años)	**+294 000**	**+184 000**
Tasa Interna de Retorno	**30 %**	**24 %**

En ambos escenarios el Valor Actual Neto es positivo y la Tasa Interna de Retorno supera con holgura la tasa de descuento, por lo que la inversión es económicamente conveniente. El periodo de recuperación, de 3,1 a 3,7 años, es coherente con el de una automatización que sustituye una alta carga de trabajo manual. Debe leerse, no obstante, como un retorno medido desde el arranque productivo: el periodo de recuperación simple no incluye los meses de fabricación, montaje y puesta en marcha previos, ni la curva de aprendizaje inicial. Dada la naturaleza referencial del presupuesto (clase 4, con una exactitud de ±30 a 50 %), la conclusión robusta no es la cifra exacta del retorno, sino que el proyecto resiste con holgura incluso un encarecimiento de la inversión del orden del 30 a 50 %. La confirmación de las cotizaciones del proveedor permitiría reducir esta incertidumbre y convertir la estimación en una de clase 2 o 3.

3.2.2 Comparación de Eficiencia frente a la Operación Actual

La comparación de eficiencia parte de una consideración de proceso: la inyectora es la estación que marca el ritmo de toda la línea, con una salida de cuatro vasos cada dieciocho segundos, es decir, unos 800 vasos por hora. Ni la operación manual ni la automatizada pueden superar ese ritmo, de modo que ambas producen el mismo volumen. La mejora del sistema propuesto, por tanto, no está en producir más, sino en la eficiencia con que se alcanza esa misma producción: cuánta mano de obra emplea, a qué costo, con qué calidad y con cuánto margen ante imprevistos. La Tabla 3.17 resume esta comparación.

Tabla 3.17. Comparación de eficiencia: operación manual actual frente al sistema automatizado propuesto.

Indicador	Actual (manual)	Propuesto (automatizado)
Dotación de personal por turno	5 operarios	1 supervisor
Producción (limitada por la inyectora)	≈ 800 vasos/h	≈ 800 vasos/h
Capacidad máxima de la célula	≈ 800 vasos/h (sin margen estable)	≈ 1220 vasos/h (+53 %)
Costo de mano de obra por 1000 vasos	≈ S/ 48	≈ S/ 15
Cobertura de inspección de calidad	Muestreo y criterio humano	100 %, automática y trazable
Ergonomía y consistencia	Manipulación repetitiva; resultado variable	Sin manipulación manual; resultado uniforme

El cambio se concentra en los recursos, no en el volumen: como el ritmo lo fija la inyectora, ambas operaciones producen lo mismo. Con un solo supervisor en lugar de cinco operarios por turno, el costo de mano de obra por vaso baja de forma sustancial —algo menos que la proporción de personal, porque el supervisor percibe una remuneración mayor—. El excedente de capacidad de la célula sobre la inyectora es, además, un margen de robustez: permite recuperar el ritmo tras una parada breve, un atasco o una variación del flujo sin acumular producto, algo de lo que carece la línea manual, que opera al límite y depende de sobredimensionar el personal para no atrasarse ante imprevistos.

En cuanto a la calidad, la diferencia es cualitativa pero relevante. La inspección manual se basa en el muestreo y en el criterio del operario, y la experiencia de la planta muestra que algunas no conformidades se detectan en etapas posteriores del proceso —nunca en manos del cliente, pero sí aguas abajo del final de línea—, lo que evidencia que la barrera manual no es plenamente confiable. El sistema propuesto inspecciona el cien por ciento de los vasos de forma automática y deja registro de cada veredicto, aceptado o descartado, lo que aporta trazabilidad y elimina la variabilidad del criterio humano. Finalmente, la automatización retira la manipulación manual repetitiva, con la mejora ergonómica y la consistencia de resultado que ello implica.

El costo de mano de obra por cada mil vasos se estima con el costo laboral de la Sección 3.2.1 y una remuneración del supervisor un 50 % mayor que la del operario; la relación entre ambos valores no depende de ese supuesto.

3.2.3 Indicadores de Desempeño

La consolidación de los análisis cinemático, estructural, de fluidos y económico permite verificar, objetivo por objetivo, que la solución responde al problema planteado. La Tabla 3.18 presenta esa verificación como una matriz de trazabilidad: para cada objetivo específico, y para el requisito habilitante de control y seguridad, indica la solución de diseño que lo materializa, el método con que se valida, el resultado esperado como criterio de aceptación y el resultado obtenido.

Tabla 3.18. Matriz de trazabilidad: del objetivo al resultado verificado.

Objetivo	**Diseño**	**Validación**	**Resultado esperado**	**Resultado obtenido**
Objetivo general	Cinco estaciones más PLC, operación continua (Sección 3.1.2)	Estudio de tiempos (Sección 3.1.8)	1 supervisor por turno	De 4–6 operarios a 1 supervisor
	Ahorro por reducción de personal (Sección 3.2.2)	VAN, TIR y periodo de recuperación (Sección 3.2.2)	VAN mayor que 0; TIR mayor que 12 %	TIR 24–30 %; recuperación 3,1–3,7 años
OE1. Automatizar el acondicionamiento del vaso a la salida de la inyectora	Bastidores y voladizos de la estación (Sección 3.1.3)	Elementos finitos estático y modal (Sección 3.1.5)	Factor de seguridad ≥ 2; f_1 ≥ 1,5× la banda de excitación	Factor de seguridad ≥ 18; f_1 = 8,02 Hz (1,6×)

	Mecanismos de manejo del producto en las cinco estaciones (Sección 3.1.3)	Simulación y cálculos analíticos (Secciones 3.1.3–3.1.4)	Fila única sin atasco; márgenes de fuerza ≥ 2 veces	Fila única sin atasco; márgenes de 7 a 20 veces
OE2. Desarrollar un sistema de visión artificial para la inspección del producto	Cámara, óptica y algoritmo de inspección (Sección 3.1.6)	Prueba de concepto del algoritmo (Sección 3.1.6)	Detección de rebaba y de descentrado de etiqueta, sin condicionar el ciclo	Ambos defectos detectados; 39,5 ms por ciclo (0,88 % del takt)
OE3. Sincronizar el empaque con el ritmo de la inyección para lograr un flujo continuo	Tres ramas concurrentes; accionamientos e instrumentación dimensionados para el ritmo (Secciones 3.1.7–3.1.8)	Tiempo de ciclo en la ruta crítica (Sección 3.1.8)	Ciclo ≤ 3,6 s; ≥ 800 vasos/h	2,95 s; 1220 vasos/h
OE4. Estandarizar el control de calidad y mitigar el riesgo ergonómico	Inspección del 100 %, doble descarte a prueba de errores y registro del veredicto (Sección 3.2.3)	Comparación frente a la operación manual (Sección 3.2.3)	100 % inspeccionado; sin manipulación manual	100 % y trazable; sin manipulación manual
Requisito habilitante.	Control por PLC con	Programa desarrollado	Secuencia completa;	Implementado y validado en

Control y seguridad	GRAFCET de tres ramas y supervisor de seguridad; red industrial determinista; funciones de seguridad STO/SS1/SBC (Sección 3.1.7; Anexos B–D)	y validado en lazo cerrado de software (PLCSIM)	seguridad según ISO 13849-1	lazo cerrado de software (Anexo H)

La matriz muestra que todos los objetivos abordados se cumplen dentro de su criterio de aceptación: el ciclo de la estación crítica queda por debajo del objetivo de robustez y del takt, la validación estructural confirma piezas holgadamente seguras y sin resonancia, la inspección por visión detecta ambos defectos sin condicionar el ciclo, y la reducción de personal arroja un retorno favorable. El programa de control se validó, además, en lazo cerrado de software (Anexo H). El detalle de cada resultado y su método de validación consta en las secciones referidas en la propia matriz.

3.3 Plan de Mantenimiento Preventivo

La conservación de la célula se aborda con una estrategia de mantenimiento preventivo basado en tiempo y uso, y no en la reacción ante la avería. El plan se apoya en las recomendaciones de los fabricantes de cada componente comercial —Festo para los actuadores y la neumática, Siemens para el control y Dorner para la faja— y se ordena según el efecto de cada elemento sobre la cadencia y la calidad. Por ello recibe atención prioritaria el desgaste de los consumibles y de las piezas de contacto —las almohadillas de poliuretano del cabezal, las ventosas de fuelle, los husillos de los ejes, la banda de la faja y el filtro de la unidad de mantenimiento—, porque son los que primero degradan el tiempo de ciclo de 2,95 segundos por vaso y la disponibilidad de la línea.

Las tareas se reparten en tres niveles de responsabilidad, acordes con la dotación de un solo supervisor por turno. El operario-supervisor de línea ejecuta las tareas diarias y semanales de limpieza, inspección visual, drenaje de la unidad de mantenimiento y reemplazo de las

piezas de desgaste por formato. El técnico de mantenimiento mecatrónico asume las tareas periódicas de lubricación de husillos y guías, ajuste de sensores, tensión y alineación de la banda, búsqueda de fugas neumáticas y limpieza del gabinete. El especialista, o el servicio del fabricante, atiende las tareas que exigen herramientas o conocimientos específicos: parámetros y firmware de los drives, copias de respaldo del programa del PLC y del panel de operador, y la verificación funcional de la cadena de seguridad.

Por seguridad, toda intervención se realiza con la máquina en parada segura y con consignación de las energías —eléctrica y neumática—, en coherencia con la prevención del arranque inesperado descrita en la Sección 2.3.3. La Tabla 3.19 resume el plan, agrupado por estación y por conjunto transversal, con la frecuencia, el criterio de aceptación y el encargado de cada tarea.

Tabla 3.19. Plan de mantenimiento preventivo por estación y conjunto.

Componente	Tarea de mantenimiento	Frecuencia	Criterio o indicador	Encargado
Estación 1 — Recepción y singulación				
Faja transportadora Dorner 3200	Verificar la tensión, el centrado y la limpieza de la banda	Mensual	Banda centrada en la guía, sin deslizamiento ni desgaste de borde	Técnico de mantenimiento mecatrónico
Cilindro del tope de separación y sus finales de carrera	Limpiar el vástago; revisar fugas y la conmutación de los sensores	Semanal	Sin fuga audible; conmutación correcta del sensor	Operario-supervisor de línea
Rieles del embudo de singulación	Inspeccionar el desgaste y el ajuste manual por formato	Mensual	Superficie sin rayado profundo; vasos en fila única sin atasco	Operario-supervisor de línea

Estación 2 — Inspección y descarte				
Cilindros de descarte y sus cuñas	Limpiar; revisar fugas y el desgaste de la cuña	Semanal	Expulsión completa del vaso; cuña sin deformación	Operario-supervisor de línea
Iluminación y óptica de la cámara	Limpiar la superficie óptica y la iluminación (coordinar con el sistema de visión)	Semanal	Superficie sin polvo ni película	Operario-supervisor de línea
Estación 3 — Enfundado				
Actuadores giratorios de la trampilla y sus cojinetes	Revisar el giro completo de 180° y la fijación; lubricar los pivotes	Mensual	Apertura y cierre completos, sin holgura	Técnico de mantenimiento mecatrónico
Magazine: placa de respaldo, resortes y varillas	Limpiar; verificar el empuje constante y el deslizamiento	Semanal	Primera bolsa siempre en posición; empuje uniforme	Operario-supervisor de línea
Cilindro de las ventosas	Limpiar el vástago; revisar fugas y fijación	Semanal	Sin fuga; carrera completa	Operario-supervisor de línea
Estación 4 — Apilado				
Ventosas de fuelle (×2)	Inspeccionar agrietamiento y desgaste; reemplazar	Mensual o por desgaste	Sello correcto: vacío confirmado sin reintentos	Operario-supervisor de línea

Generador de vacío (filtro y silenciador)	Limpiar o cambiar el elemento; verificar el nivel de vacío	Trimestral	Nivel de vacío dentro de rango	Técnico de mantenimiento mecatrónico
Husillos del asistente de inserción y del elevador	Lubricar según el intervalo del fabricante; revisar holgura y ruido	Trimestral	Sin juego axial; marcha suave y silenciosa	Técnico de mantenimiento mecatrónico
Anillo Coanda y punta del asistente de inserción	Limpiar; despejar la ranura de aire y las boquillas	Semanal	Ranura y boquillas despejadas; faldón bien peinado	Operario-supervisor de línea
Frenos de los servomotores verticales	Verificar la retención del freno y la temperatura	Semestral	El freno retiene el eje sin energía	Especialista o servicio del fabricante
Estación 5 — Encajado				
Almohadillas de poliuretano del cabezal	Inspeccionar el espesor y el desgaste; reemplazar por formato	Mensual o por formato	Sin pérdida de agarre; la torre no desliza	Operario-supervisor de línea
Microcilindros de sujeción y grapas de montaje	Revisar fugas, fijación y el cierre simultáneo	Mensual	Cierre uniforme de las tres almohadillas	Operario-supervisor de línea
Ejes X, Y, Z del pórtico y reductor	Lubricar husillos y guías; revisar la correa del eje X y la holgura	Trimestral	Correa con tensión correcta; sin juego ni ruido	Técnico de mantenimiento mecatrónico

Cadena portacables y cableado del pórtico	Revisar la flexión, el desgaste y las conexiones	Semestral	Sin cables pinzados ni conductores dañados	Técnico de mantenimiento mecatrónico
Estructura (bastidor)				
Uniones de perfil, escuadras y anclajes	Reapretar al par; inspeccionar grietas y corrosión	Semestral	Tornillería al par; sin aflojamiento ni corrosión	Técnico de mantenimiento mecatrónico
Servicios neumáticos y de vacío				
Unidad de mantenimiento (FRL)	Drenar el condensado; verificar el lubricante y la presión de 6 bar	Diaria	Vaso sin condensado; presión estable de 6 bar	Operario-supervisor de línea
Filtro del aire y arranque suave	Cambiar el elemento filtrante; verificar el escape seguro	Semestral	Caída de presión del filtro dentro de rango; escape funcional	Técnico de mantenimiento mecatrónico
Terminal de válvulas y tubería	Detectar fugas; revisar el estado de las conexiones	Mensual	Sin caída de presión con el sistema en reposo	Técnico de mantenimiento mecatrónico
Control, eléctrico y seguridad (gabinete)				
Gabinete: PLC, drives, fuente y red	Soplar el polvo; revisar la ventilación y el apriete de borneras	Trimestral	Temperatura normal; sin alarmas activas	Técnico de mantenimiento mecatrónico

Programa del PLC y proyecto del panel de operador	Realizar copia de respaldo	Trimestral o tras cada cambio	Respaldo vigente y verificado	Especialista o servicio del fabricante
Cadena de seguridad: seta, cortina, relé y STO de los drives	Prueba funcional documentada de la parada de emergencia	Semestral	Parada efectiva dentro del tiempo previsto (ISO 13849-1)	Especialista o servicio del fabricante

Las frecuencias indicadas son un punto de partida que el equipo de mantenimiento debe ajustar tras los primeros meses de operación, en función del régimen real de la línea, del número de turnos y del registro histórico de incidencias. Se recomienda llevar una bitácora de cada intervención, pues ese historial es la base para evolucionar, más adelante, hacia un mantenimiento predictivo apoyado en la información que ya entregan los propios equipos, como el sensor de vacío integrado, los encoders de los servomotores y los avisos de los drives.

Capítulo 4: Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

El trabajo confirma que es viable automatizar el final de línea de la inyectora IML de INROPLAS mediante un sistema mecatrónico de cinco estaciones gobernado por un controlador lógico programable bajo una lógica de operación continua. Con ello se cumple el objetivo general: la solución reemplaza la dotación de cuatro a seis operarios por un único supervisor por turno y elimina la necesidad de sobredimensionar el personal, sosteniendo la cadencia de la inyectora sin depender de la motricidad humana.

- Respecto del primer objetivo específico —automatizar el acondicionamiento del vaso a la salida de la inyectora—, se diseñó y validó la cadena completa de estaciones que conducen el producto desde la recepción hasta el encajado. El manejo sin contacto del faldón mediante el efecto Coanda y la sujeción por vacío resuelven el manejo de la película flexible sin dañarla, y la validación por elementos finitos confirma que las piezas críticas trabajan muy por debajo de su límite elástico y sin resonancia, de modo que el diseño se gobierna por la rigidez y no por la resistencia.

- En cuanto al segundo objetivo específico —desarrollar el sistema de visión artificial—, este detecta los dos defectos críticos de la línea IML —rebaba perimetral ($\Delta R > 1{,}2$ mm) y descentrado de la etiqueta ($\varepsilon_{Hu} > 3$ %)— con un tiempo de procesamiento de 39,5 ms, dos órdenes de magnitud por debajo del takt, sin condicionar el ciclo. Con ello, el control de calidad pasa de la inspección manual por muestreo a la inspección automática del cien por ciento de los vasos, con registro trazable por lote.

- Sobre el tercer objetivo específico —sincronizar el empaque con el ritmo de la inyección—, el estudio del tiempo de ciclo confirma que la estación crítica opera en torno a 2,95 segundos por vaso, por debajo del objetivo de robustez de 3,6 segundos y del takt de 4,5 segundos. La capacidad de la célula, cercana a 1220 vasos por hora, supera los 800 que entrega la inyectora, de modo que el final de línea sostiene un flujo continuo sin frenar el ciclo de inyección.

- Respecto del cuarto objetivo específico —estandarizar el control de calidad y mitigar el riesgo ergonómico—, al eliminar la manipulación manual repetitiva el sistema

suprime la sobrecarga ergonómica del final de línea, elimina la variabilidad del criterio humano y uniformiza el resultado del proceso.

- El análisis económico muestra que, operando la línea en dos turnos, la reducción de personal genera un ahorro recurrente de entre S/ 110 700 y S/ 130 200 al año, según se valore al piso del sueldo mínimo o con las cargas de ley. Contrastado con una inversión referencial de unos S/ 353 000, el proyecto arroja un periodo de recuperación de 3,1 a 3,7 años, un Valor Actual Neto ampliamente positivo y una Tasa Interna de Retorno de entre 24 y 30 %, lo que confirma su viabilidad económica aun bajo supuestos conservadores.

En conjunto, la validación virtual sustituye la prueba física dentro del alcance de este trabajo y respalda el cumplimiento de los objetivos planteados.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda completar los ensayos que afinan los parámetros adoptados como valores de diseño: el coeficiente de fricción entre la almohadilla y el vaso, la fuerza de rotura de los precortes de la bolsa por formato, el nivel de vacío del generador y el rozamiento real de la placa de respaldo sobre sus guías.

Se recomienda, además, comprobar la estabilidad vertical del vaso en la singulación mediante un ensayo de banco o una verificación tridimensional puntual, dado que la simulación física de la singulación es bidimensional y no representa la inclinación del vaso fuera del plano.

El programa de control, ya validado en lazo cerrado de software (Anexo H), podría acoplarse a un modelo dinámico de la planta para medir el tiempo de ciclo de forma independiente del cálculo analítico; se recomienda esa medición como refinamiento futuro.

Para afinar el análisis del retorno de la inversión se recomienda obtener las cotizaciones en firme de los proveedores, que permitirán reemplazar el presupuesto referencial (estimación de clase 4, con una exactitud de ±30 a 50 %) por una estimación de clase 2 o 3 y reducir así la incertidumbre sobre el periodo de recuperación.

Se recomienda validar experimentalmente los umbrales de inspección ($\Delta R > 1{,}2$ mm y $\varepsilon\_Hu > 3$ %) con una muestra estadísticamente representativa de vasos conformes y no conformes

producidos en línea, ajustando los parámetros con el sistema montado en la maqueta antes de la puesta en marcha definitiva. Asimismo, se recomienda implementar el registro de imágenes y veredictos en una base de datos para habilitar la trazabilidad por lote y facilitar auditorías de calidad.

Como líneas de mejora futura se plantea evaluar trayectorias con perfil de jerk acotado para reducir aún más el tiempo de ciclo, una vía que exploran Szczepański et al. (2024) y Bottin et al. (2022), e integrar los datos de la celda con la inyectora en el marco de la manufactura inteligente (Lee, 2018).

Capítulo 5: Referencias

- Bottin, M., Boschetti, G., & Rosati, G. (2022). Optimizing cycle time of industrial robotic tasks with multiple feasible configurations at the working points. *Robotics, 11*(1), 16. https://doi.org/10.3390/robotics11010016
- Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8*(6), 679–698. https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851
- Chávez-Módena, M., Martinez-Cava, A., Marín-Coca, S., & González, L. (2024). Numerical and experimental characterization of a Coanda-type industrial air amplifier. *Applied Sciences, 14*(4), 1524. https://doi.org/10.3390/app14041524
- D'Imperio, S., Berruti, T. M., Gastaldi, C., & Soccio, P. (2022). Tunable vibration absorber design for a high-precision Cartesian robot. *Robotics, 11*(5), 103. https://doi.org/10.3390/robotics11050103
- Fang, Y., Zhu, G.-N., Zhao, Y., & Gu, C. (2023). Design procedure for motion profiles with sinusoidal jerk for vibration reduction. *Applied Sciences, 13*(24), 13320. https://doi.org/10.3390/app132413320
- Grabiec, J., Pajor, M., & Dunaj, P. (2022). Finite element modeling of dynamic properties of the delta robot with base frame. *Materials, 15*(19), 6797. https://doi.org/10.3390/ma15196797
- Ha, J., & Jeong, J. (2021). CNN-based defect inspection for injection molding using edge computing and industrial IoT systems. *Applied Sciences, 11*(14), 6378. https://doi.org/10.3390/APP11146378
- Hu, M.-K. (1962). Visual pattern recognition by moment invariants. *IRE Transactions on Information Theory, 8*(2), 179–187. https://doi.org/10.1109/TIT.1962.1057692
- Hubert, T., Khorasani, A., Usman, M., Nouhi, H., Furnémont, R., Vanderborght, B., Van De Perre, G., & Verstraten, T. (2025). Cobots designed for strength, not stiffness. *IEEE Access, 13*, 129787–129802. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3591262

- Lee, H. (2018). Real-time parameter optimization based on neural network for smart injection molding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 324*, 012076. https://doi.org/10.1088/1757-899X/324/1/012076
- Lee, S., Kim, J., & Park, H. (2021). Fault detection using Canny edge detection and Mask R-CNN in injection molding. *ACM ICCV 2021.* https://doi.org/10.1145/3484274.3484286
- Liu, H., Chen, X., & Wang, Z. (2024). Improved Canny operator with adaptive scale factor for non-maximum suppression in industrial visual inspection. *Measurement, 224*, 113901. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113901
- Liu, H., Li, X., Ma, Q., & Feng, W. (2021). Development of a non-contact gripper with flowrate amplification using a Coanda ejector. *Vacuum, 187*, 110108. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110108
- López-Rodríguez, D., Janda, A., Garcimartín, A., Zuriguel, I., & Maza, D. (2019). Effect of hopper angle on granular clogging. *Physical Review E, 99*, 032901. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.99.032901
- Maślanka, P., Kowalczyk, W., & Wróbel, A. (2025). Integration of machine vision and PLC-based control for scalable quality inspection in Industry 4.0. *Sensors, 25*(20), 6383. https://doi.org/10.3390/s25206383
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Productivity Press.
- Newman, B. G. (1961). The deflexion of plane jets by adjacent boundaries — Coanda effect. En G. V. Lachmann (Ed.), *Boundary layer and flow control* (Vol. 1, pp. 232–264). Pergamon Press.
- Rashid, A., Müller, T., & García, E. (2025). Investigation of the automatic sorting machine based on PLC–pneumatic system. *Journal of Physics: Conference Series, 2933*, 012025. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2933/1/012025
- Rotter, M., Schwarz, K., & Heinemann, F. (2024). Inclusion detection in injection-molded parts with the use of edge masking. *Sensors, 24*(22), 7150. https://doi.org/10.3390/s24227150

- Szczepański, R., Erwinski, K., Tejer, M., & Daab, D. (2024). Optimal path planning algorithm with built-in velocity profiling for collaborative robot. *Sensors, 24*(16), 5332. https://doi.org/10.3390/s24165332
- Vieira, L., Santos, P., & Oliveira, R. (2024). OpenCV/Python execution on PLCnext industrial controllers for real-time visual inspection over PROFINET. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 20*(1), 456–465. https://doi.org/10.1109/TII.2023.3298124
- Vitrani, G., Cortinovis, S., Fiorio, L., Maggiali, M., & Romeo, R. A. (2023). Improving the grasping force behavior of a robotic gripper: Model, simulations, and experiments. *Robotics, 12*(6), 148. https://doi.org/10.3390/robotics12060148
- Vorasawad, K., Park, M., & Kim, C. (2023). Efficient navigation and motion control for autonomous forklifts in smart warehouses: LSPB trajectory planning and MPC implementation. *Machines, 11*(12), 1050. https://doi.org/10.3390/machines11121050
- Xu, J., Danielczuk, M., Ichnowski, J., Mahler, J., & Goldberg, K. (2020). Minimal work: A grasp quality metric for deformable hollow objects. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. (Preprint: arXiv:1909.11226)
- Yoo, Y., Eom, J., Park, M. J., & Cho, K.-J. (2023). Compliant suction gripper with seamless deployment and retraction for robust picking against depth and tilt errors. *IEEE Robotics and Automation Letters, 8*(3), 1311–1318. https://arxiv.org/abs/2211.16090
- Yoon, H. J. (2019). Trapezoidal motion profile to suppress residual vibration of flexible object moved by robot. *Electronics, 8*(1), 30. https://doi.org/10.3390/electronics8010030
- Zhang, Y., & Wang, T. (2025). Design of industrial robot sorting and assembly control system based on PROFINET. *Frontiers in Mechanical Engineering, 11*, 1635881. https://doi.org/10.3389/fmech.2025.1635881
- Zuriguel, I., Parisi, D. R., Hidalgo, R. C., Lozano, C., Janda, A., Gago, P. A., Peralta, J. P., Ferrer, L. M., Pugnaloni, L. A., Clément, E., Maza, D., Pagonabarraga, I., &

Garcimartín, A. (2014). Clogging transition of many-particle systems flowing through bottlenecks. *Scientific Reports, 4*, 7324. https://doi.org/10.1038/srep07324

Normas técnicas

- IEC 61131-3. *Programmable controllers — Part 3: Programming languages*. International Electrotechnical Commission.
- ISO 4414:2010. *Pneumatic fluid power — General rules and safety requirements for systems and their components*. International Organization for Standardization.
- ISO 12100:2010. *Safety of machinery — General principles for design — Risk assessment and risk reduction*. International Organization for Standardization.
- ISO 13849-1. *Safety of machinery — Safety-related parts of control systems — Part 1: General principles for design*. International Organization for Standardization.
- ISO 13850. *Safety of machinery — Emergency stop function — Principles for design*. International Organization for Standardization.
- ISO 14118. *Safety of machinery — Prevention of unexpected start-up*. International Organization for Standardization.

Anexos

A continuación se listan los anexos del informe; su contenido se presenta íntegro en las páginas siguientes.

- **Anexo A — Lista de componentes (BOM):** relación completa de los componentes comerciales y de las piezas a medida del sistema.
- **Anexo B — Diagramas de control:** diagrama de flujo del proceso, GRAFCET de control y GRAFCET supervisor de seguridad.
- **Anexo C — Programa de control (diagrama de contactos):** programa del PLC en lenguaje Ladder, implementado en TIA Portal.
- **Anexo D — Mapa de señales de entrada y salida.**
- **Anexo E — Planos de fabricación:** planos de conjunto y de detalle de las piezas a medida.

- **Anexo F — Planos eléctricos:** cableado de entradas y salidas del PLC y distribución de 24 V CC.
- **Anexo G — Supuestos y fuentes del análisis económico:** base de los precios referenciales y de los porcentajes adoptados en la Sección 3.2.1, con sus fuentes.
- **Anexo H — Validación de la lógica de control (SITL):** capturas de la compilación sin errores, la ejecución en estado RUN y el monitoreo en línea del programa y del supervisor de seguridad en PLCSIM.
- **Anexo I — Resultados de la simulación por elementos finitos (SolidWorks 2025):** tabla resumen de los estudios estático y modal por subconjunto —pórtico, cabezal, apilado, poste de ventosas/Coanda/jaula y mástil del asistente de inserción—, con material, esfuerzo de von Mises máximo, desplazamiento y primera frecuencia natural.

Anexo A — Lista de componentes (BOM)

Relación completa de los componentes comerciales (COTS) y de las piezas a medida del sistema, con su código o número de parte, cantidad, tipo y notas de material o función.

Tabla A.1. Lista de componentes del sistema.

N.º	Código / N.º de parte	Descripción	Cant.	Tipo	Nota
1. Pórtico de encajado (ejes X-Y-Z y cabezal)					
1	EGC-80-1000-TB-KF-0H-GK	Eje X del pórtico (motriz, correa)	1	COTS	
2	EGC-80-1000-TB-KF	Riel guía paralelo del eje X	1	COTS	
3	EGC-70-800-BS-10P-KF	Eje Y del pórtico (husillo)	1	COTS	
4	ESBF-BS-63-600-10P	Eje Z del pórtico (vástago vertical)	1	COTS	
5	EMMT-AS-60-M	Servomotor del eje X	1	COTS	
6	EMMT-AS-60-S	Servomotor del eje Y	1	COTS	
7	EMMT-AS-60-S (con freno)	Servomotor del eje Z	1	COTS	
8	EMGA-60-P-G12	Reductor del eje Z (8141736)	1	COTS	
9	EAMK / EAMF / EAMC / EADS	Kits de acople motor-eje	juego	COTS	según eje
10	Cuerpo_cabezal_L (placa herradura)	Cabezal de sujeción radial	1	A medida	Al 6061-T6
11	ADN-16-15-I-P-A (536228)	Microcilindros de sujeción radial	3	COTS	
12	EAHF-V2-50/63-P (1547781)	Grapas de montaje del cabezal y del mástil	14	COTS	
13	Almohadillas de poliuretano	Pads del cabezal (juego por formato)	juego	A medida	PU
2. Apilado y enfundado					
14	ESBF-BS-63-800-25P	Asistente de inserción (Plug Assist)	1	COTS	
15	EMMT-AS-60-S (con freno)	Servomotor del Plug Assist	1	COTS	
16	EGC-70-600-BS-10P	Elevador de indexación	1	COTS	
17	EMMT-AS-60-S (con freno)	Servomotor del elevador	1	COTS	
18	DRVS-12-180-P (1845711)	Actuadores giratorios de la trampilla	2	COTS	
19	DFM-16-150-B-P-A-GF (529120)	Cilindro de las ventosas	1	COTS	
20	VASB-30-1/8-PUR-B (1395690)	Ventosas de fuelle	2	COTS	
21	OVEL-5-H-10-PQ-VQ4-RQ-C-R8	Generador de vacío (con sensor)	1	COTS	
22	Anillo_coanda	Anillo soplador de efecto Coanda	1	A medida	
23	Jaula iris (base fija, levas, placa de desgaste, varillas)	Jaula de guía de la torre	1	A medida	POM / AISI 304
24	Plataforma_elevadora + pad	Plataforma del elevador	1	A medida	Al 6061-T6 / PU

25	Magazine (placa de respaldo, varillas, bloques, columna, platina)	Almacén de bolsas wicket	1	A medida	AISI 304
26	Resortes de fuerza constante	Empuje de la placa de respaldo	4	COTS	
27	Compuerta_trampilla + soportes de cojinete	Compuertas de la trampilla	2	A medida	
28	Punta_plugassist	Punta autocentrante del Plug	1	A medida	POM
3. Transición faja - trampilla					
29	DFM-40-200-P-A-KF (170945)	Cilindro vertical del transicionador	1	COTS	
30	DFM-25-200-P-A-GF (532317)	Cilindro horizontal del transicionador	1	COTS	
31	Placa_hugger (placa de abrace)	Placa cóncava de empuje del vaso	1	A medida	
4. Recepción, singulación y descarte (zona de faja)					
32	Faja Dorner 3200 Belted	Faja transportadora de acople (paquete)	1	COTS	ver ficha
33	RIEL_DERECHO_deflector / RIEL_IZQUIERDO_datum	Rieles del embudo de singulación (ajuste manual)	2	A medida	PTFE
34	DFM-16-160-B-P-A-GF (529120)	Cilindro del tope de separación (metering)	1	COTS	
35	SUJETADOR_actuador_metering	Soporte del tope de metering	1	A medida	
36	DSNU-20-300-PPV-A	Cilindros de los kickers de descarte	2	COTS	Verificar N.º de parte Festo (carrera 300 mm)
37	CUNA_KICKER	Cuñas empujadoras de descarte	2	A medida	POM
38	SUJETADOR_KICKER_DSNU20	Soportes de los kickers	2	A medida	
39	Rampas y botes de descarte	Canales y contenedores de descarte	2	A medida	
40	Estructura domo + domo LED	Soporte de cámara e iluminación	1	COTS / A medida	Visión (coautor)
5. Estructura (bastidor)					
41	Perfil de aluminio 90x90 (varios largos)	Columnas, vigas y mástil del bastidor	varios	COTS	6063-T6
42	Perfil de aluminio 45x45 (varios largos)	Amarres del bastidor	varios	COTS	6063-T6
43	Escuadras y gussets (Bosch Rexroth)	Uniones estructurales	varios	COTS	
44	Soporte_placa_trampilla, soporte_elevador, poste común, soportes EAHF	Soportes a medida del bastidor	varios	A medida	Al 6061-T6
6. Control y eléctrico (gabinete) — no incluido en el ensamble mecánico					
45	S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC (6ES7214-1AG40-0XB0)	Controlador lógico programable (PLC)	1	COTS	
46	SM 1223 (DI/DO) + SM 1234 (AI/AO)	Módulos de entradas/salidas	s/E-S	COTS	dimensionar al mapa de señales
47	KTP700 Basic PN (6AV2123-2GB03-0AX0)	Panel de operador (HMI)	1	COTS	
48	CMMT-AS-C2-3A-MP-S1 (8143163)	Servo-drives (PROFINET)	5	COTS	

49	SCALANCE X208 (6GK5208-0BA10-2AA3)	Switch industrial gestionado (VLAN) — PROFINET y Modbus TCP	1	COTS	Gestionado: soporta la VLAN dedicada de visión (Modbus TCP) separada del tráfico PROFINET (§3.1.6/§3.1.7).
50	SITOP PSU100S 24V/10A (6EP1334-2BA20)	Fuente de 24 V CC	1	COTS	
51	Relé de seguridad 3SK1 / Pilz PNOZ	Relé/controlador de seguridad	1	COTS	
52	Cortina de luz (SICK deTec/Banner) + seta E-stop	Dispositivos de seguridad	1	COTS	ISO 13850
53	Terminal VTUG-10 + VUVG	Terminal de válvulas (8x 5/2 + 1x 3/2)	1	COTS	
54	MS6-FRC-1/4 + MS6-SV	Unidad de mantenimiento (FRL) y arranque suave	1	COTS	
55	SMT-8M / SOEG-RT-M18 / SOEG-RSP-M18 / SRBS	Sensórica (finales de carrera y fotocélulas)	varios	COTS	
7. Consumibles					
56	Bolsas wicket (por formato)	Empaque del producto	-	Producto	
57	Cajas Merch / Master Blue Box	Embalaje de salida	-	Producto	

Anexo B — Diagramas de control

Diagrama de flujo del proceso, GRAFCET de control de tres ramas concurrentes y GRAFCET supervisor de seguridad. Por ser diagramas verticales extensos, se presentan girados para aprovechar el ancho de la página.

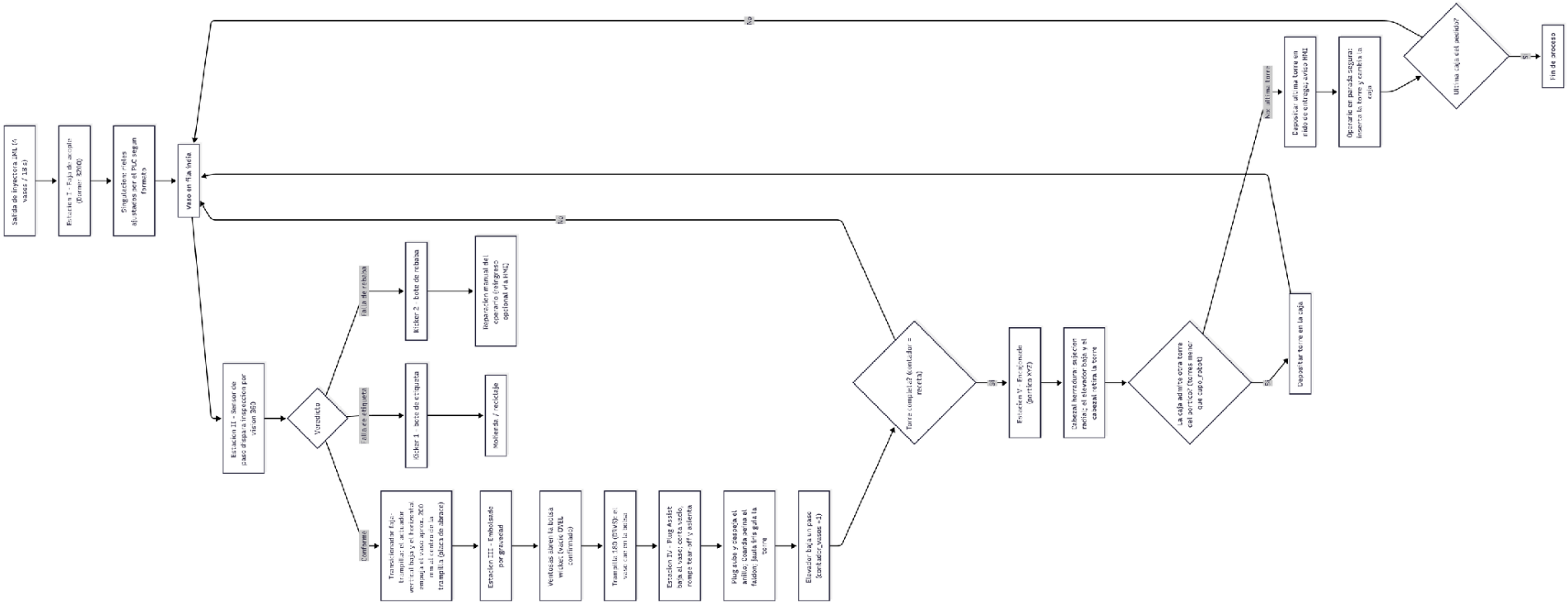


Imagen B.1. Diagrama de flujo del proceso.

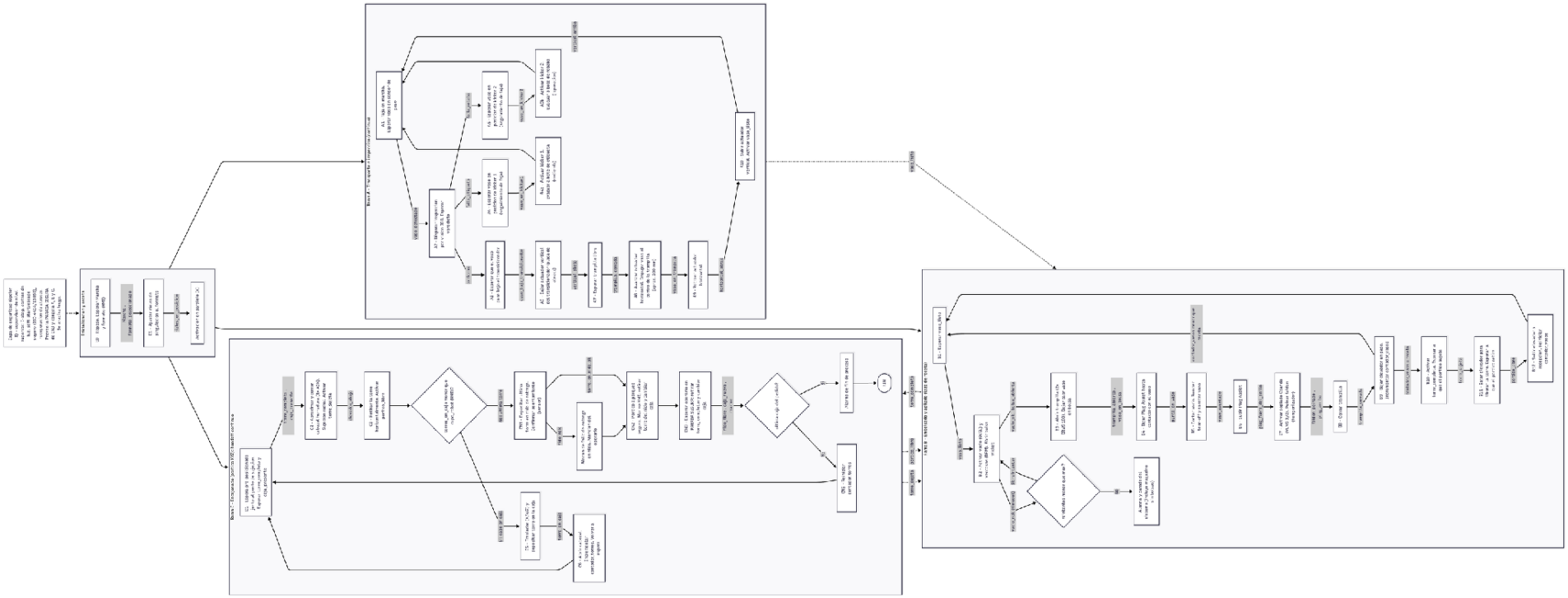


Imagen B.2. GRAFCET de control (tres ramas concurrentes).

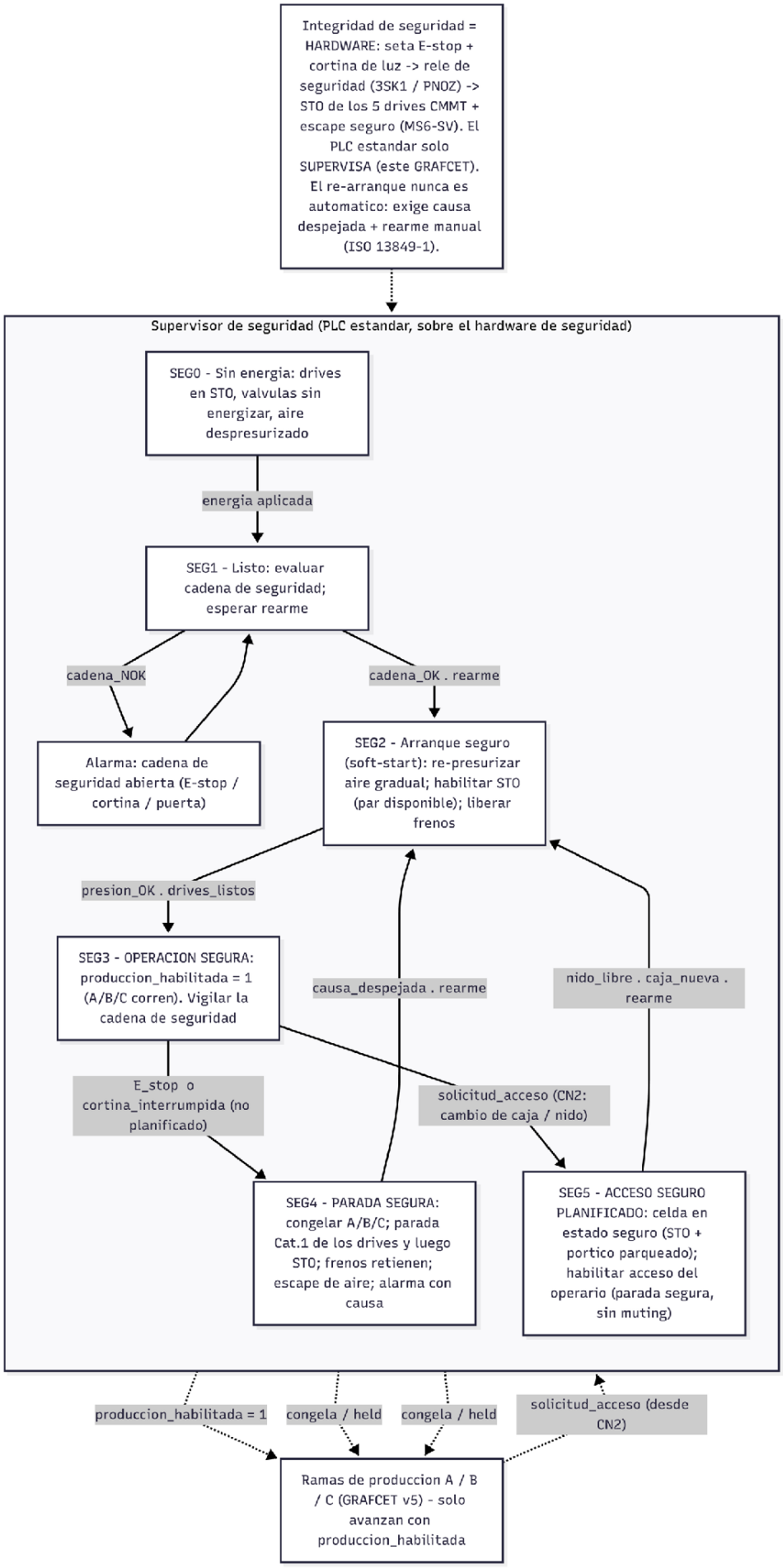


Imagen B.3. GRAFCET supervisor de seguridad.

Anexo C — Programa de control (diagrama de contactos)

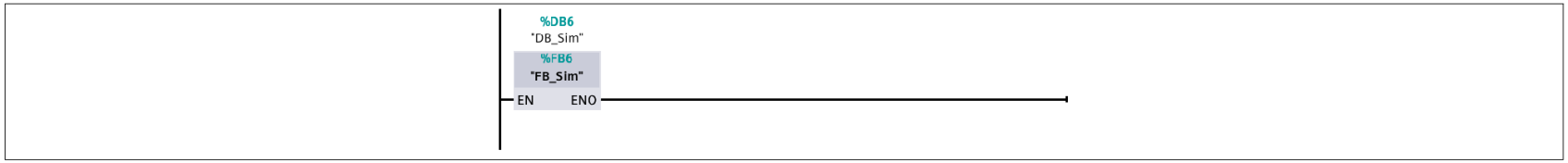
Programa del PLC en lenguaje de diagrama de contactos (Ladder), implementado en TIA Portal como secuenciador manual de una etapa activa por rama. Las láminas se muestran en orientación horizontal para su lectura.

Main [OB1]

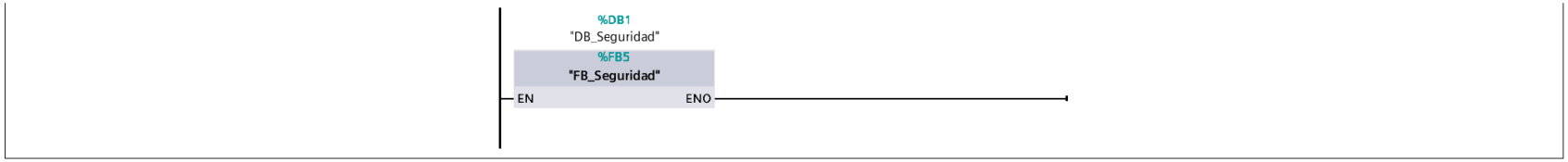
Main Propiedades							
General							
Nombre	Main	**Número**	1	**Tipo**	OB	**Idioma**	KOP
Numeración	Automático						
Información							
Título	"Main Program Sweep (Cycle)"	**Autor**		**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Comentario
Temp			
Constant			

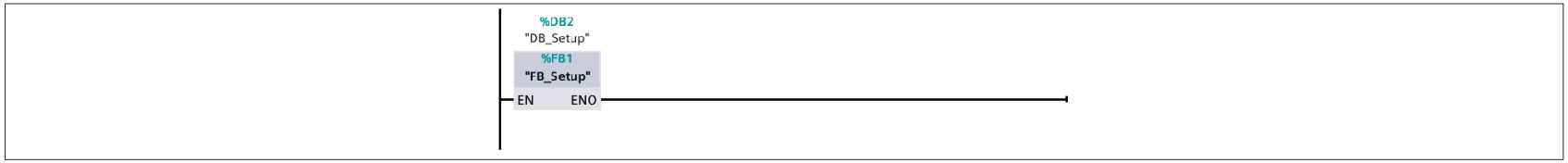
Segmento 1:



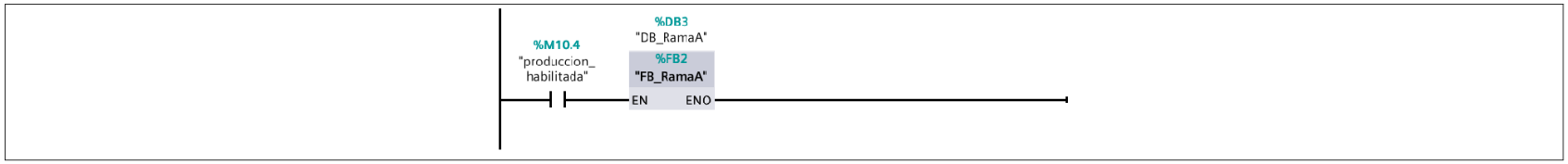
Segmento 2: Seguridad



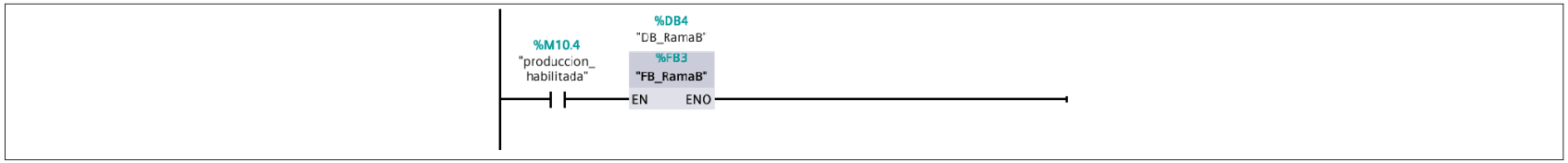
Segmento 3: Setup



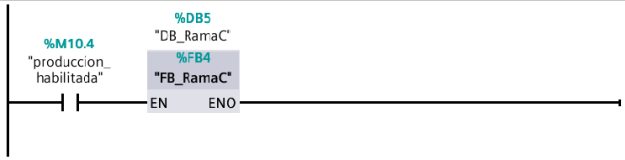
Segmento 4: Rama A (solo si hay produccion_habilitada)



Segmento 5: Rama B (solo si hay produccion_habilitada)



Segmento 6: Rama C (solo si hay produccion_habilitada)


%M10.4
"produccion_
habilitada"
%DB5
"DB_RamaC"
%FB4
"FB_RamaC"
EN
ENO

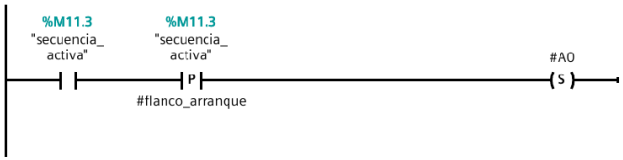
FB_RamaA [FB2]

FB_RamaA Propiedades							
General							
Nombre	FB_RamaA	**Número**	2	**Tipo**	FB	**Idioma**	KOP
Numeración	Automático						
Información							
Título		**Autor**		**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

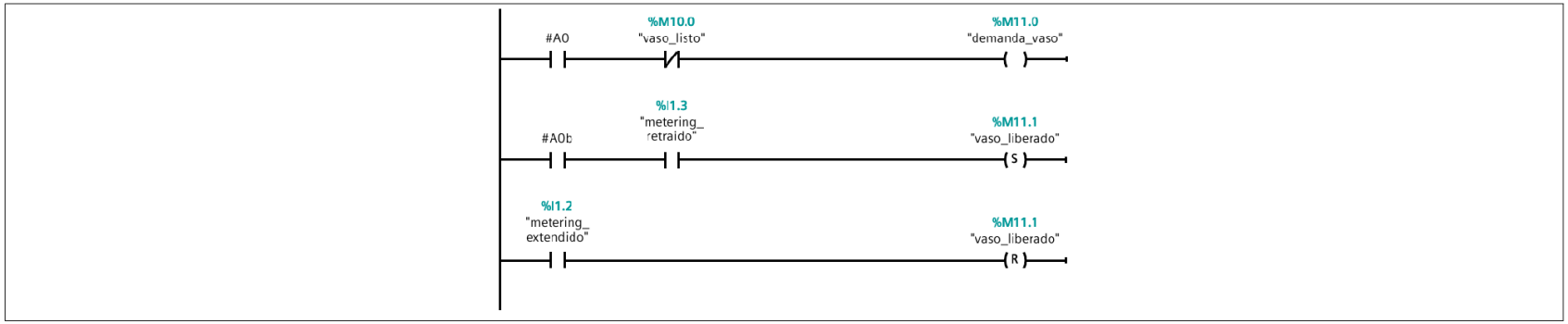
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
Input									
Output									
InOut									
▼ Static									
A0	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
A0b	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
A0c	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
A1	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
A2	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
A3	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
A4	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
A4b	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
A5	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
A5b	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
A6	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		

Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Es-cribi-ble desd e HMI/ OPC UA/ Web API	Visible en HMI Engi-neering	Valor de ajuste	Supervi-sión	Comentario
A7	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
A8	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
A9	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
A10	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
flanco_arranque	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
TON_Kicker1	TON_TIME		No remanente	True	True	True	True		
PT	Time	T#0ms	No remanente	True	True	True	False		
ET	Time	T#0ms	No remanente	True	False	True	False		
IN	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Q	Bool	false	No remanente	True	False	True	False		
TON_Kicker2	TON_TIME		No remanente	True	True	True	True		
PT	Time	T#0ms	No remanente	True	True	True	False		
ET	Time	T#0ms	No remanente	True	False	True	False		
IN	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Q	Bool	false	No remanente	True	False	True	False		
Temp									
Constant									

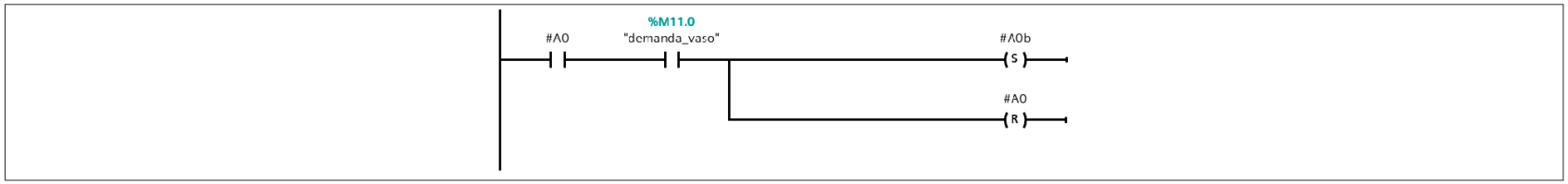
Segmento 1: Arranque de la rama (una sola vez, cuando Setup termina)



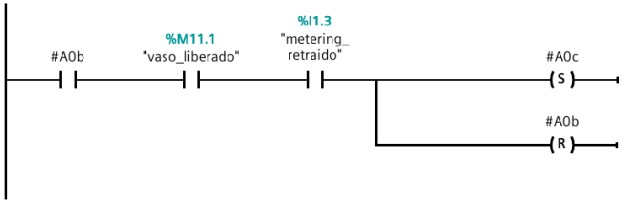
Segmento 2: Producción de banderas de la rama A



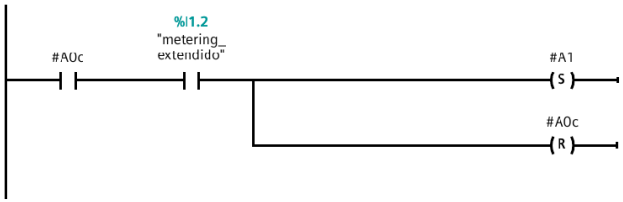
Segmento 3: A0 -> A0b: hay demanda del siguiente vaso



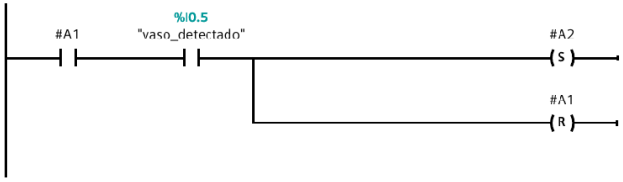
Segmento 4: A0b -> A0c: el metering soltó un vaso



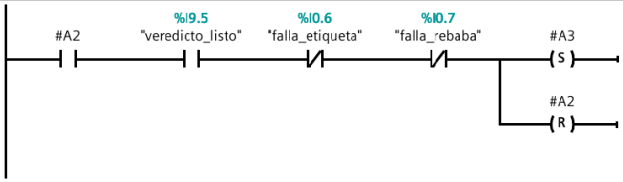
Segmento 5: A0c -> A1: el tope volvió a extenderse (retiene el siguiente)



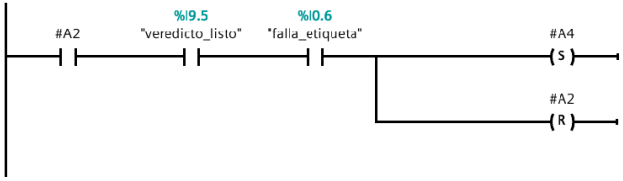
Segmento 6: A1 -> A2: vaso detectado en el sensor de paso



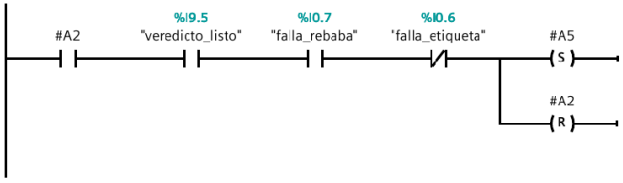
Segmento 7: A2 -> A3: veredicto CONFORME (ninguna falla)



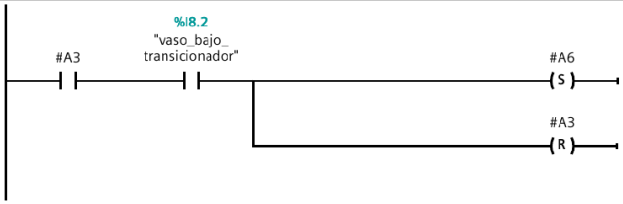
Segmento 8: A2 -> A4: veredicto FALLA ETIQUETA



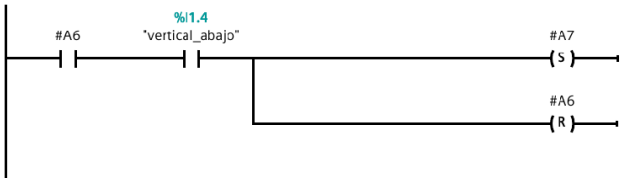
Segmento 9: A2 -> A5: veredicto FALLA REBABA



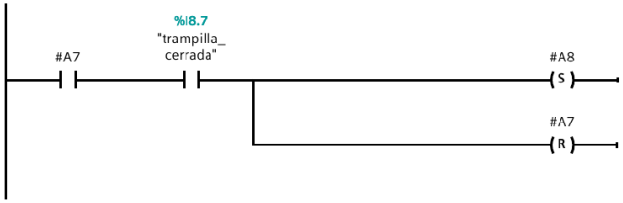
Segmento 10: A3 -> A6: el vaso pasó bajo el transicionador



Segmento 11: A6 -> A7: vertical abajo

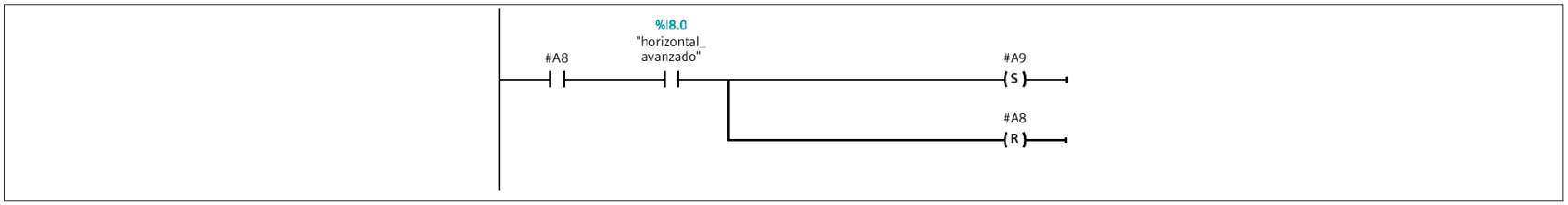


Segmento 12: A7 -> A8: trampilla libre (cerrada)

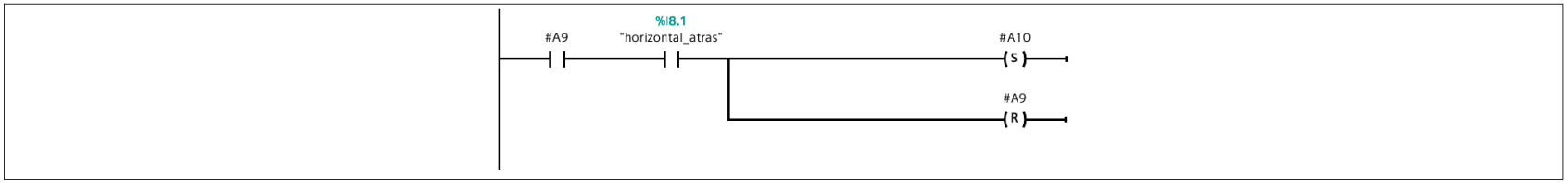


Segmento 13: A8 -> A9: vaso centrado en la trampilla

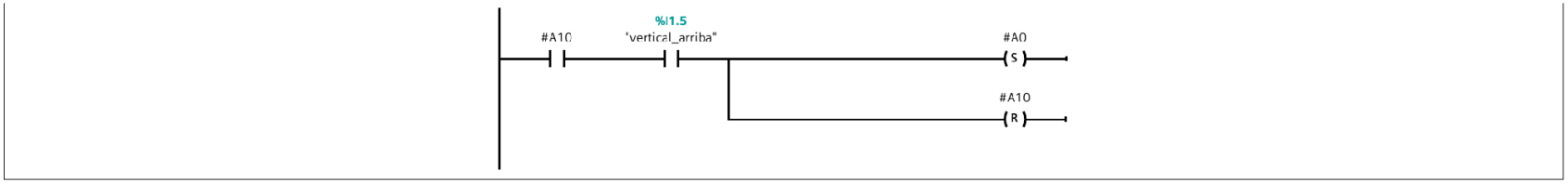
horizontal_avanzado = "vaso_en_trampilla" del GRAFCET; es la misma señal, %I8.0



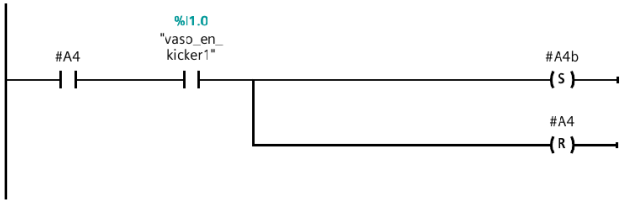
Segmento 14: A9 -> A10: horizontal retraído



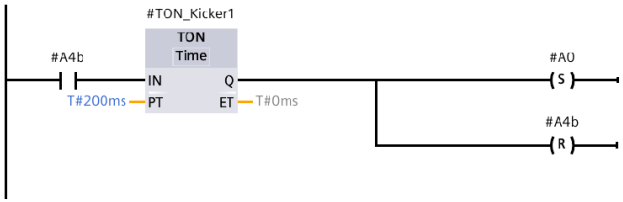
Segmento 15: A10 -> A0: vertical arriba, ciclo completo



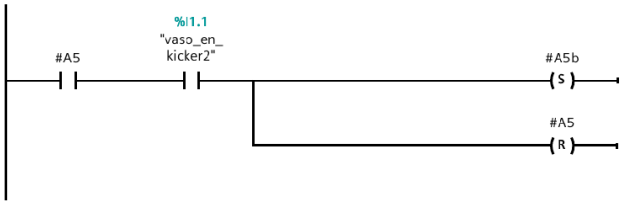
Segmento 16: A4 -> A4b: vaso en posición de kicker 1



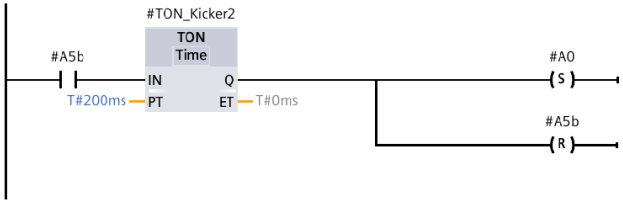
Segmento 17: A4b -> A0: descarte hecho (vuelve a esperar)



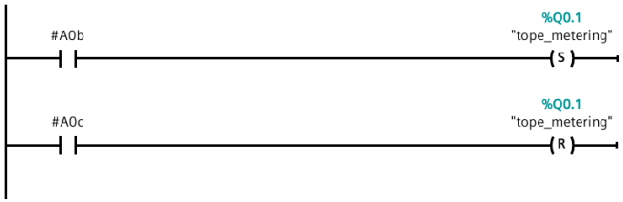
Segmento 18: A5 -> A5b: vaso en posición de kicker 2



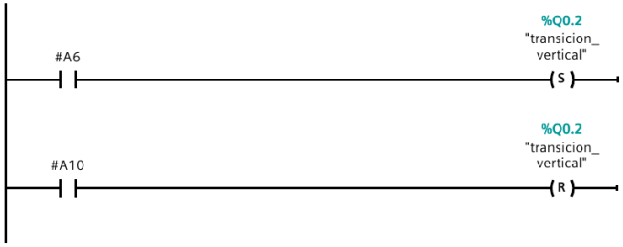
Segmento 19: A5b -> A0: descarte hecho (vuelve a esperar)



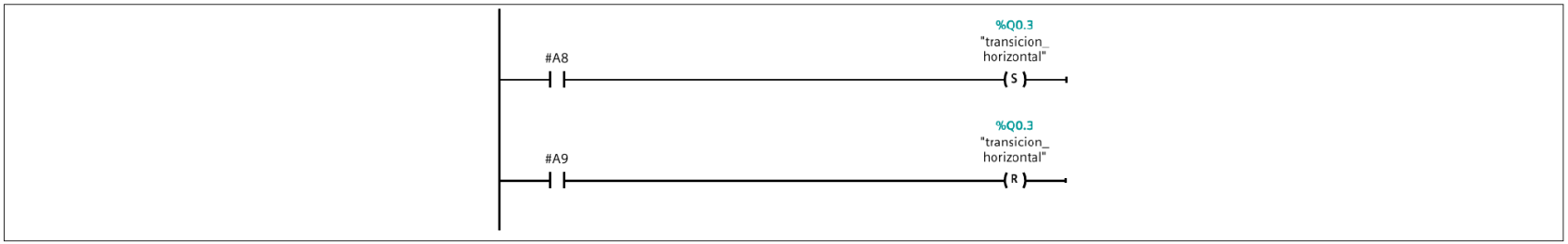
Segmento 20: Acc B — Tope de metering: retraer en A0b, reextender en A0c



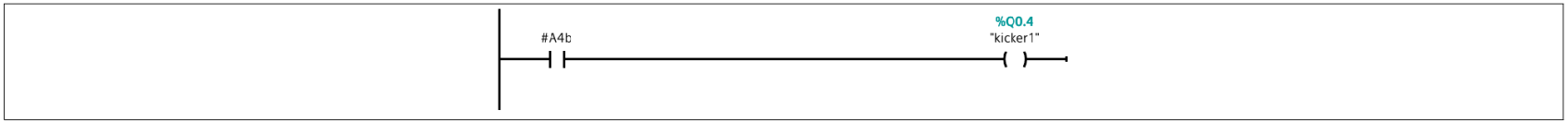
Segmento 21: Acc C — Transicionador vertical: baja en A6, sube en A10 (se mantiene abajo A6..A9)



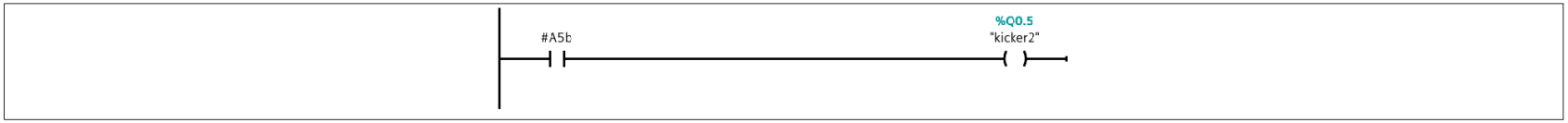
Segmento 22: Acc D — Transicionador horizontal: avanza en A8, retrae en A9



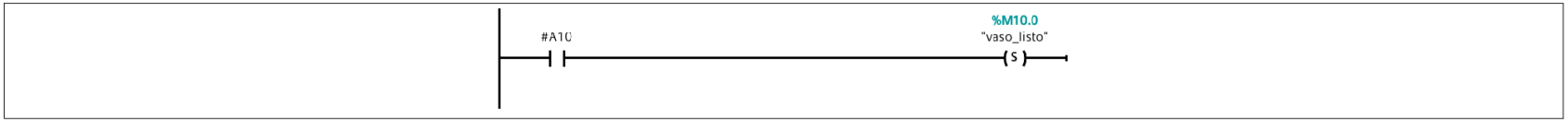
Segmento 23: Acc E — Kicker 1 (descarte etiqueta), momentáneo



Segmento 24: Acc F — Kicker 2 (descarte rebaba), momentáneo



Segmento 25: Acc G — Activar bandera vaso_listo al terminar el ciclo (la consume la rama B)



FB_RamaB [FB3]

FB_RamaB Propiedades							
General							
Nombre	FB_RamaB	**Número**	3	**Tipo**	FB	**Idioma**	KOP
Numeración	Automático						
Información							
Título		**Autor**		**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

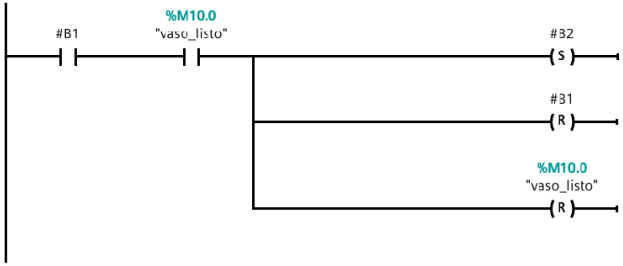
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
Input									
Output									
InOut									
Static									
B1	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
B2	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
B3	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
B4	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
B5	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
B6	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
B7	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
B8	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
B9	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
B10	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
B11	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		

Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Es-cribi-ble desd e HMI/ OPC UA/ Web API	Visible en HMI Engi-neering	Valor de ajuste	Supervi-sión	Comentario
B12	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
flanco_arranque_B	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
flanco_cuenta	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
contador_vasos	Int	0	No remanente	True	True	True	False		
BSTOP	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
B2R	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
reintentos_vacio	Int	0	No remanente	True	True	True	False		
flanco_reintento	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
TON_Coanda	TON_TIME		No remanente	True	True	True	True		
PT	Time	T#0ms	No remanente	True	True	True	False		
ET	Time	T#0ms	No remanente	True	False	True	False		
IN	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Q	Bool	false	No remanente	True	False	True	False		
TON_Vacio	TON_TIME		No remanente	True	True	True	True		
PT	Time	T#0ms	No remanente	True	True	True	False		
ET	Time	T#0ms	No remanente	True	False	True	False		
IN	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Q	Bool	false	No remanente	True	False	True	False		
Temp									
Constant									

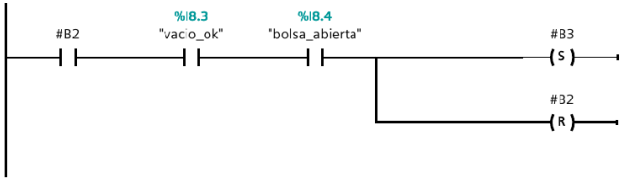
Segmento 1: Arranque de la rama B (una vez, cuando Setup termina)



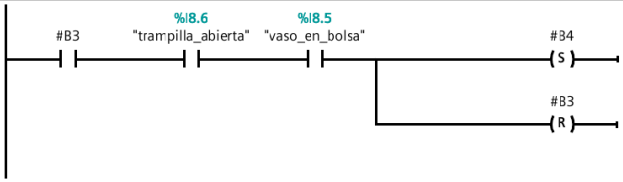
Segmento 2: B1 -> B2: llegó un vaso listo (y se consume la bandera)



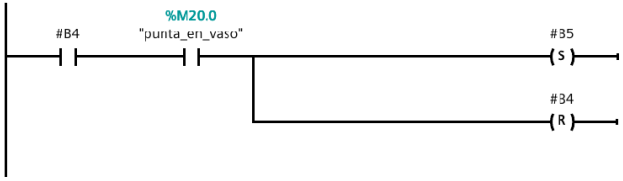
Segmento 3: B2 -> B3: vacío confirmado y bolsa abierta



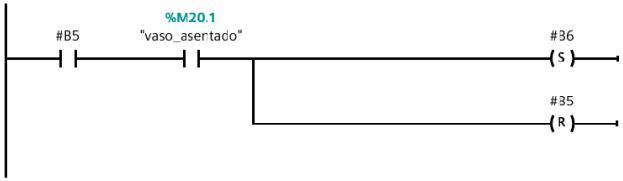
Segmento 4: B3 -> B4: trampilla abierta y vaso dentro de la bolsa



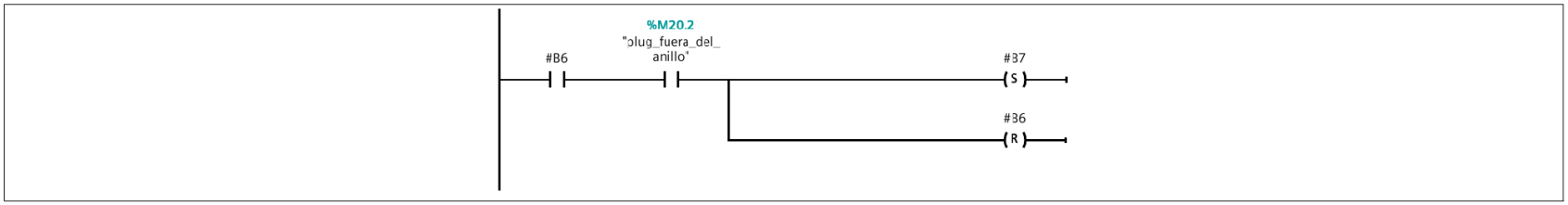
Segmento 5: B4 -> B5: el Plug tocó el vaso



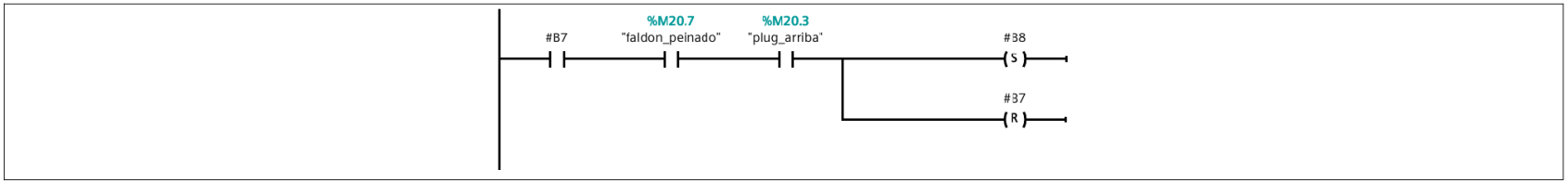
Segmento 6: B5 -> B6: vaso asentado



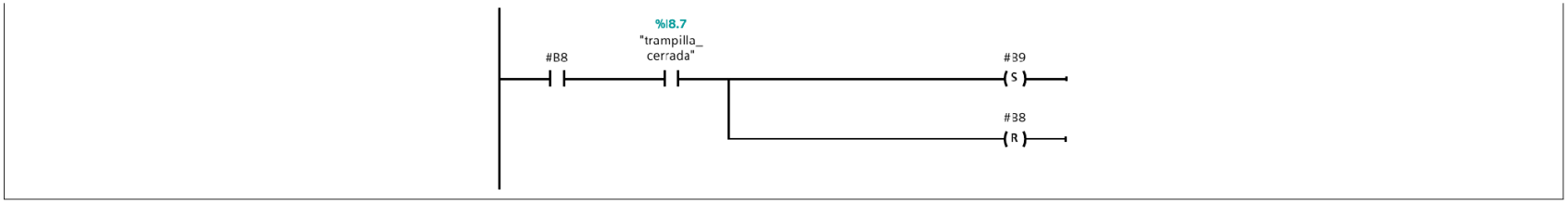
Segmento 7: B6 -> B7: el Plug salió del anillo



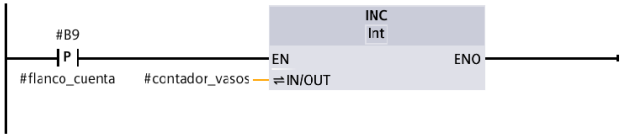
Segmento 8: B7 -> B8: faldón peinado y Plug arriba



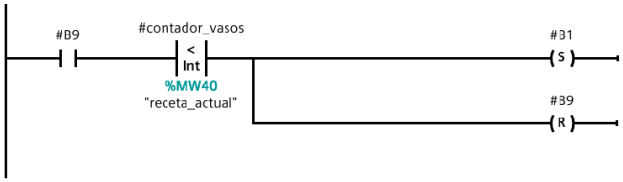
Segmento 9: B8 -> B9: trampilla cerrada



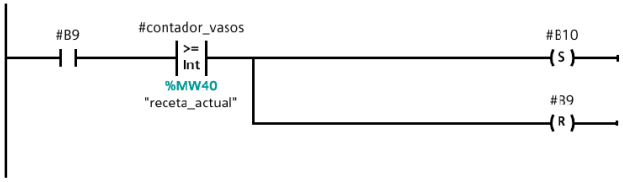
Segmento 10: Incrementar el contador al entrar a B9



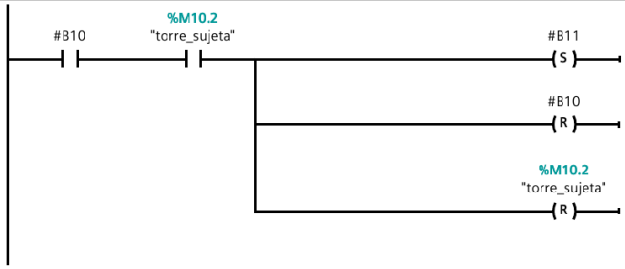
Segmento 11: B9 -> B1: aún falta para completar la torre



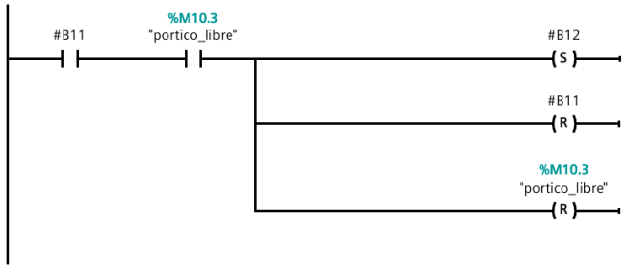
Segmento 12: B9 -> B10: torre completa



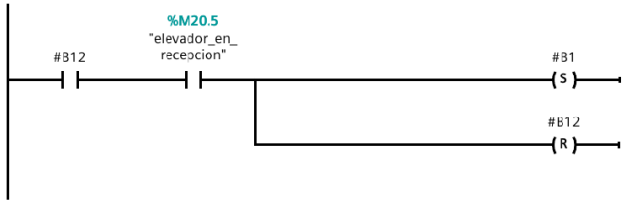
Segmento 13: B10 -> B11: el pórtico sujetó la torre (se consume la bandera)



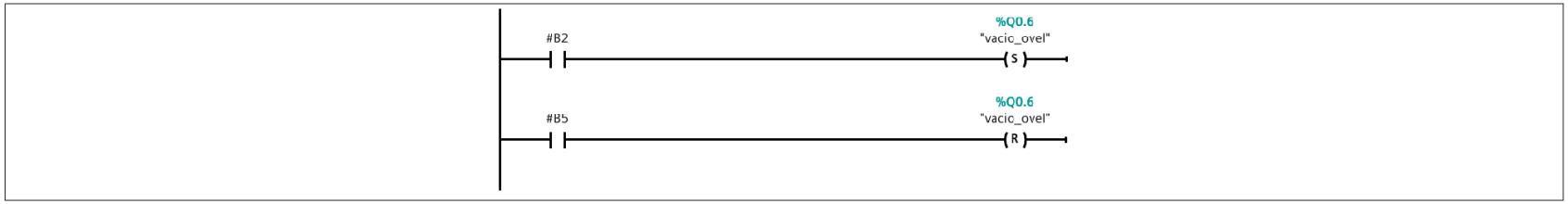
Segmento 14: B11 -> B12: el pórtico retiró la torre (se consume la bandera)



Segmento 15: B12 -> B1: vuelve a recibir (reinicia el ciclo de la torre)



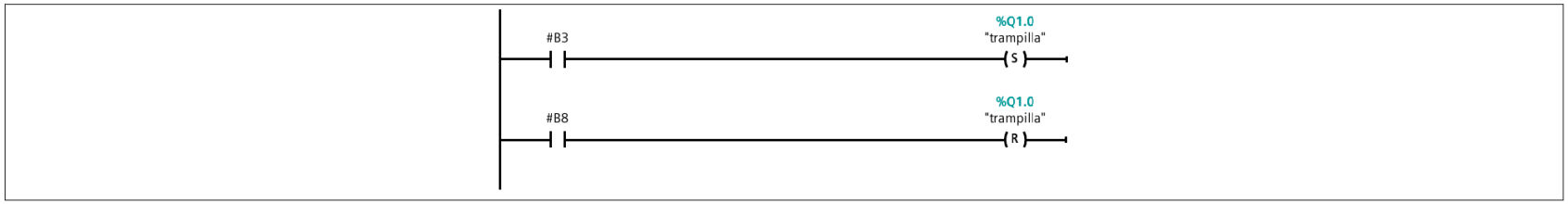
Segmento 16: Acc A — Vacío: activar en B2, cortar en B5



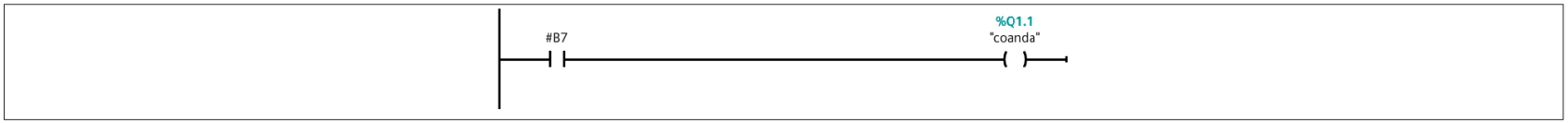
Segmento 17: Acc B — Ventosas (abren la bolsa): activar en B2, soltar en B8



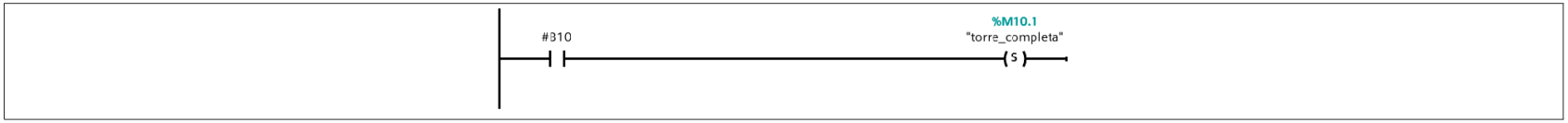
Segmento 18: Acc C — Trampilla: abrir en B3, cerar en B8



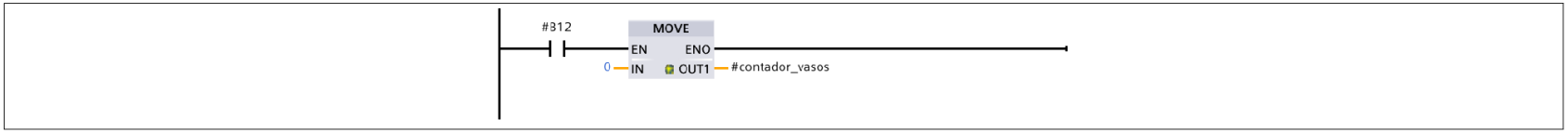
Segmento 19: Acc D — Soplado Coanda durante B7 (momentáneo)



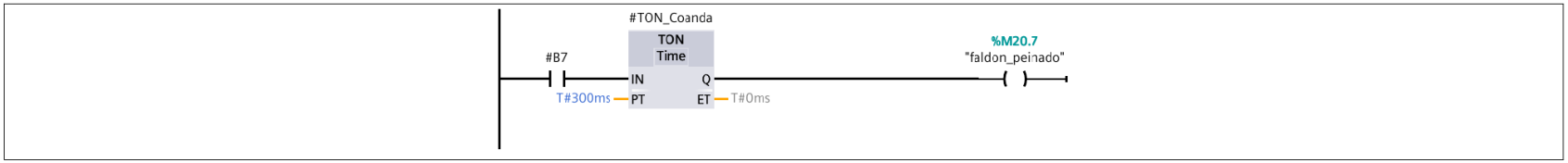
Segmento 20: Acc E — Activar bandera torre_completa (la consume la rama C)



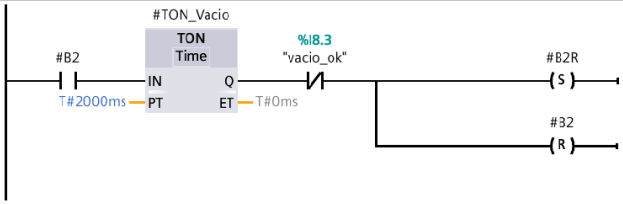
Segmento 21: Acc F — Reiniciar el contador al subir el elevador a recepción



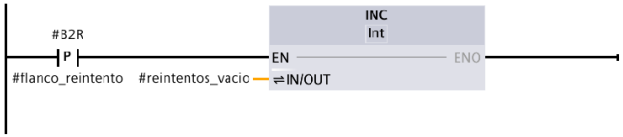
Segmento 22: Coanda: temporizador t_coanda activa faldon_peinado



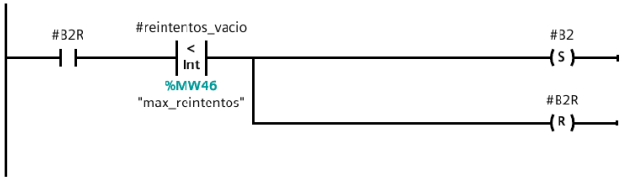
Segmento 23: B2 -> B2R: timeout sin vacío



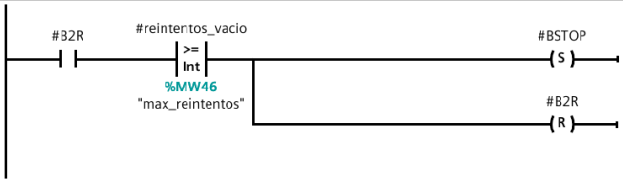
Segmento 24: incrementar reintentos al entrar a B2R



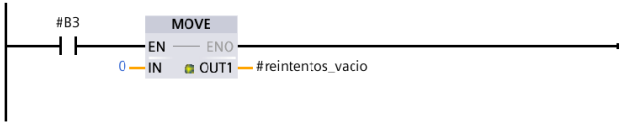
Segmento 25: B2R -> B2: aún quedan reintentos



Segmento 26: B2R -> BSTOP: se agotaron los reintentos


#32R
#reintentos_vacio
>=
Int
%MW46
"max_reintentos"
#BSTOP
S
#B2R
R

Segmento 27:


#B3
MOVE
EN
ENO
0
IN
OUT1
#reintentos_vacio

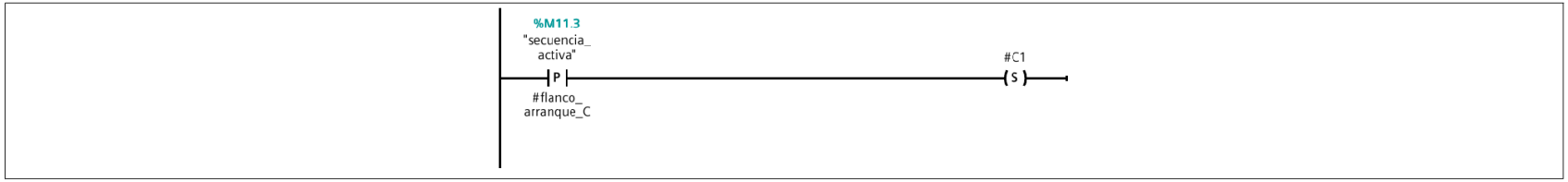
FB_RamaC [FB4]

FB_RamaC Propiedades							
General							
Nombre	FB_RamaC	**Número**	4	**Tipo**	FB	**Idioma**	KOP
Numeración	Automático						
Información							
Título		**Autor**		**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

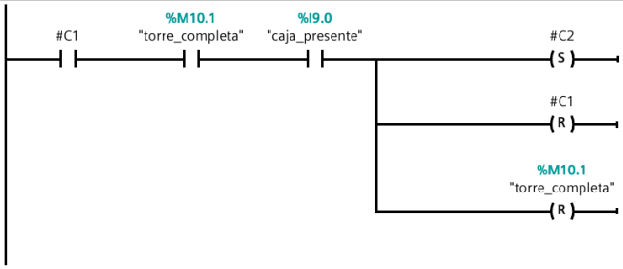
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
Input									
Output									
InOut									
Static									
C1	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
C2	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
C3	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
C5	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
C6	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
CN1	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
CN2	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
CN3	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
CN5	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
CFIN	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
flanco_arranque_C	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		

Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Es-cribi-ble desd e HMI/ OPC UA/ Web API	Visible en HMI Engi-neering	Valor de ajuste	Supervi-sión	Comentario
flanco_torres	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
flanco_cajas	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
contador_torres	Int	0	No remanente	True	True	True	False		
contador_cajas	Int	0	No remanente	True	True	True	False		
CNE	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
TON_Nido	TON_TIME		No remanente	True	True	True	True		
PT	Time	T#0ms	No remanente	True	True	True	False		
ET	Time	T#0ms	No remanente	True	False	True	False		
IN	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Q	Bool	false	No remanente	True	False	True	False		
Temp									
Constant									

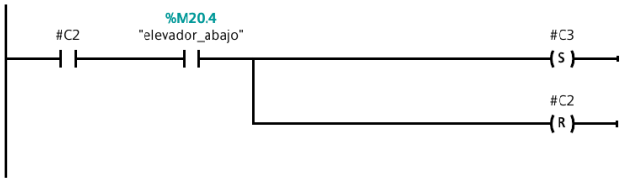
Segmento 1: Arranque de la rama C (una vez, cuando Setup termina)



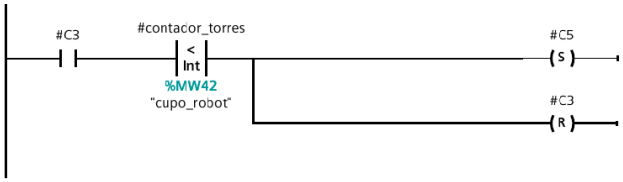
Segmento 2: C1 -> C2: hay torre completa y caja presente (se consume torre_completa)



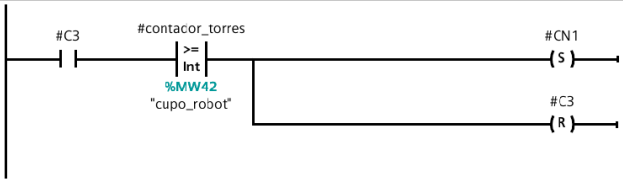
Segmento 3: C2 -> C3: elevador abajo (cabezal ya sujetó)



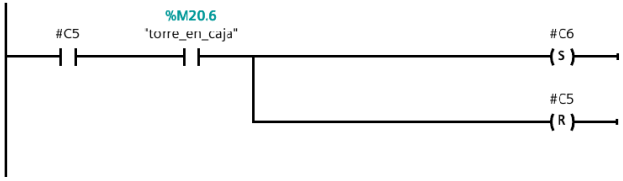
Segmento 4: C3 -> C5: aún cabe en la caja



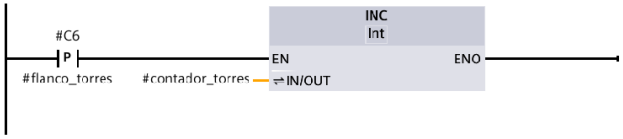
Segmento 5: C3 -> CN1: es la última torre (no cabe)



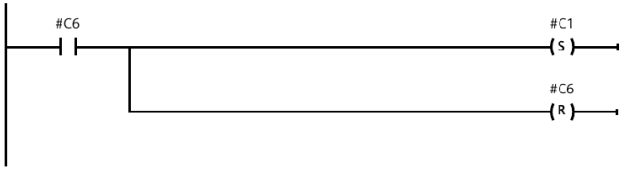
Segmento 6: C5 -> C6: torre depositada en la caja



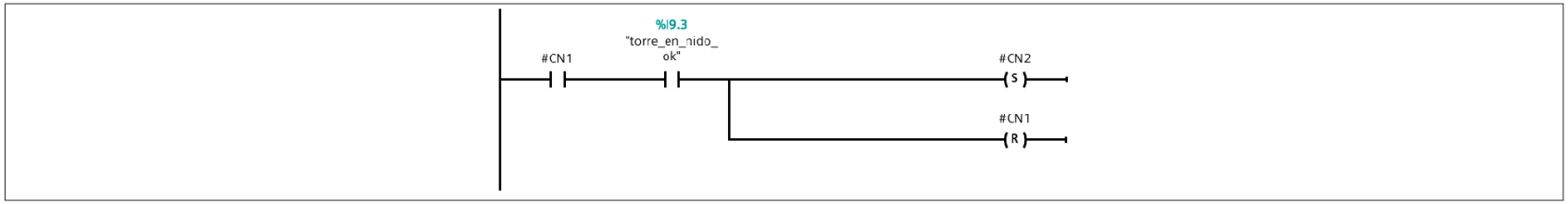
Segmento 7: Incrementar torres al entrar a C6



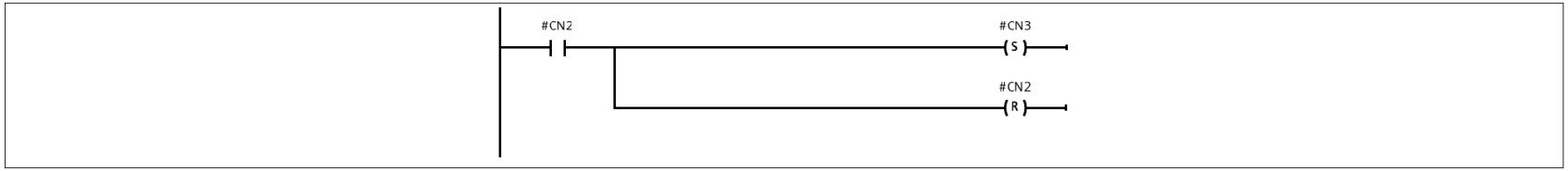
Segmento 8: C6 -> C1: vuelve a esperar la siguiente torre



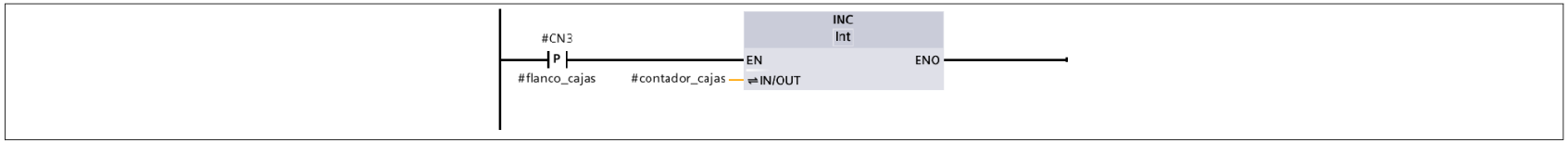
Segmento 9: CN1 -> CN2: última torre asentada en el nido



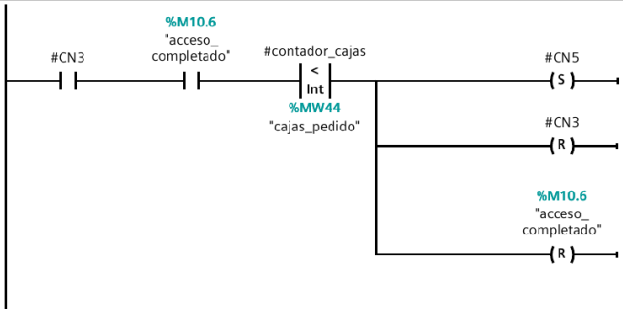
Segmento 10: CN2 -> CN3: pórtico en parqueo (se pidió el acceso seguro)



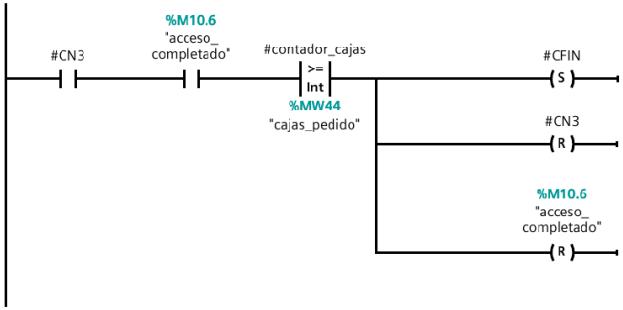
Segmento 11: Incrementar cajas al entrar a CN3



Segmento 12: CN3 -> CN5: acceso completado y aún quedan cajas del pedido



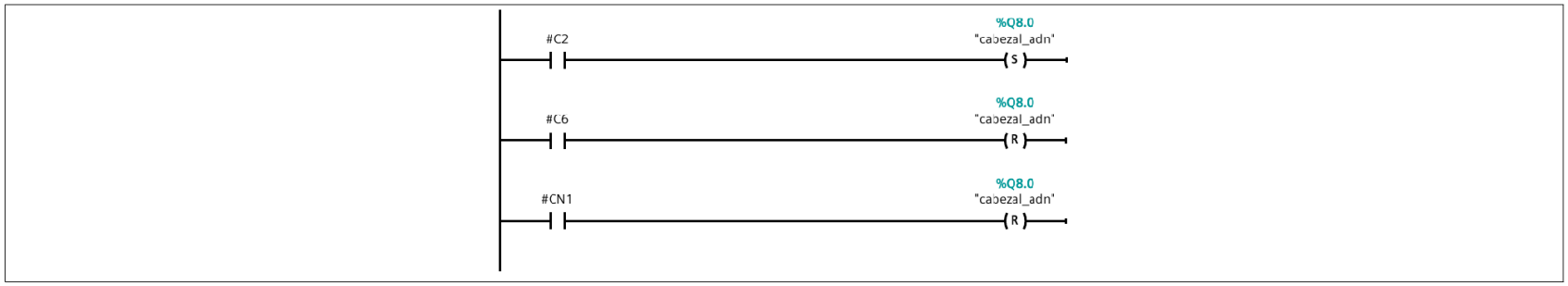
Segmento 13: CN3 -> CFIN: acceso completado y era la última caja del pedido



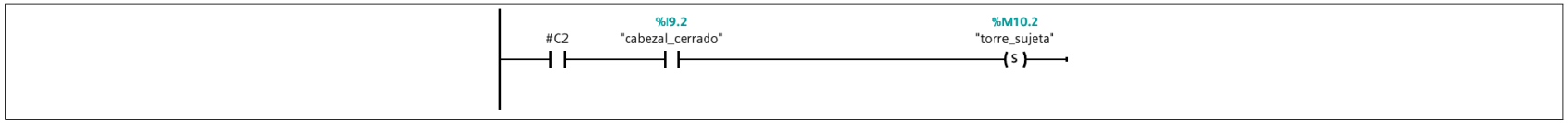
Segmento 14: CN5 -> C1: caja nueva, reinicia el conteo de torres



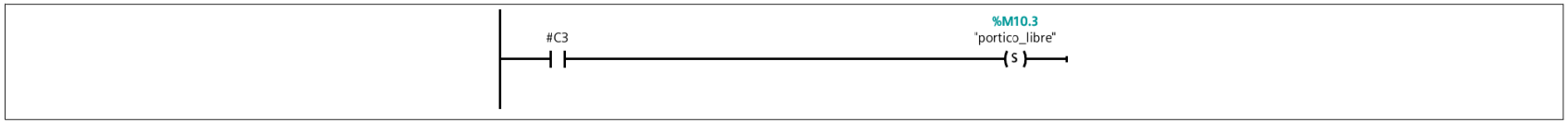
Segmento 15: Acc A — Cerrar cabezal en C2; abrir en C6 (caja) y en CN1 (nido)



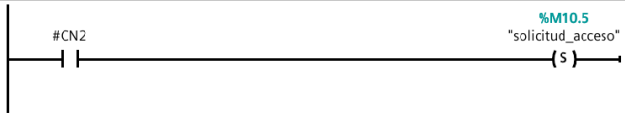
Segmento 16: Acc B — Activar bandera torre_sujeta en C2 (la consume la rama B)



Segmento 17: Acc C — Activar bandera portico_libre en C3 (la consume la rama B)



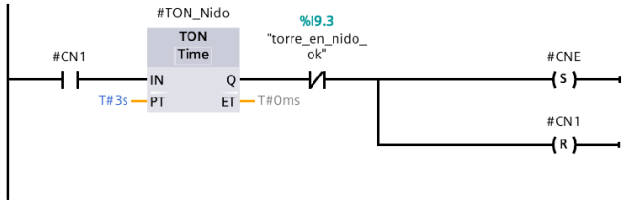
Segmento 18: ACC D -Pedir acceso seguro en CN2 (la consume FB_Seguridad)



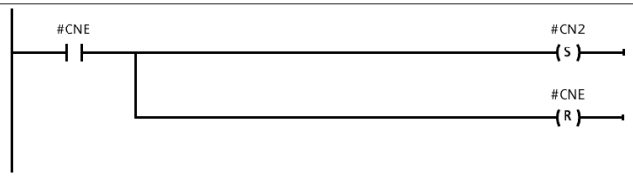
Segmento 19: Acc E — Reiniciar el conteo de torres al empezar una caja nueva



Segmento 20: CN1 -> CNE: timeout sin asentar (fallo)



Segmento 21:

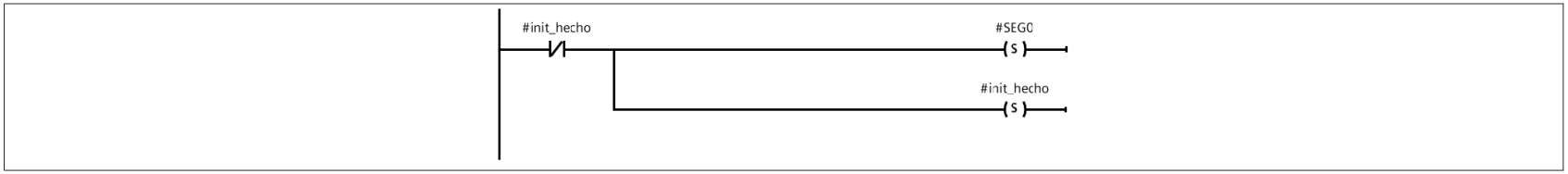


FB_Seguridad [FB5]

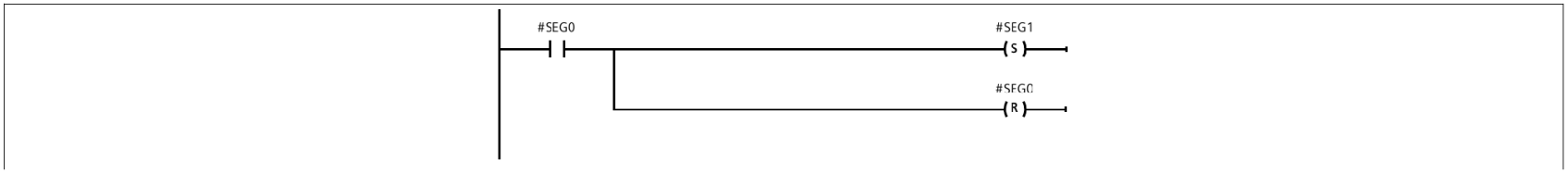
FB_Seguridad Propiedades							
General							
Nombre	FB_Seguridad	**Número**	5	**Tipo**	FB	**Idioma**	KOP
Numeración	Automático						
Información							
Título		**Autor**		**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
Input									
Output									
InOut									
Static									
SEG0	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
SEG1	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
SEG2	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
SEG3	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
SEG4	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
SEG5	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
init_hecho	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Temp									
Constant									

Segmento 1: Inicializacion: arrancar en SEG0 (una sola vez)

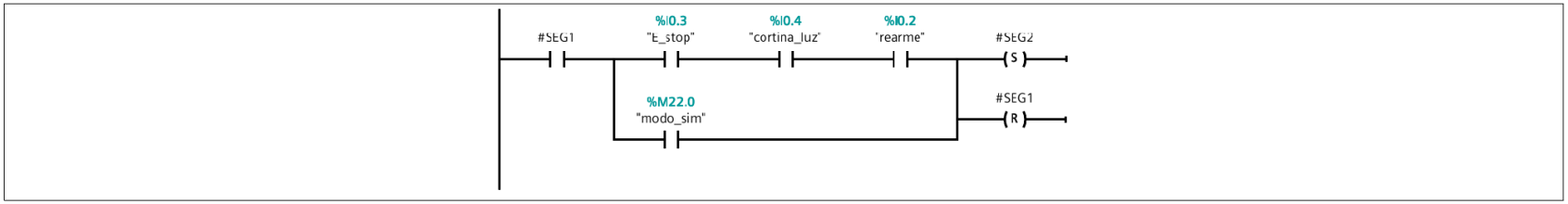


Segmento 2: SEG0 -> SEG1: hay energia (PLC corriendo)



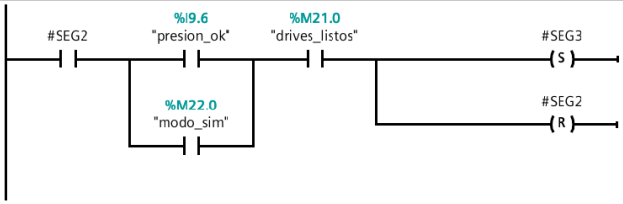
Segmento 3: SEG1 -> SEG2: cadena de seguridad OK y rearme

Puente SITL — inerte con modo_sim=0

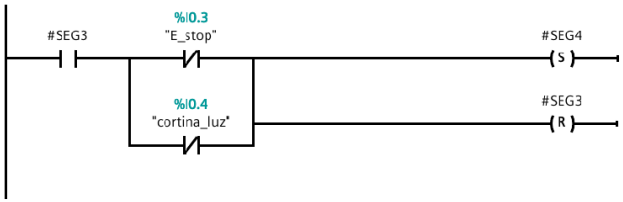


Segmento 4: SEG2 -> SEG3: presion OK y drives listos (soft-start completo)

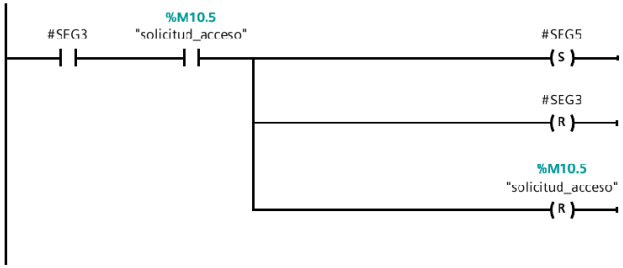
Puente SITL — inerte con modo_sim=0



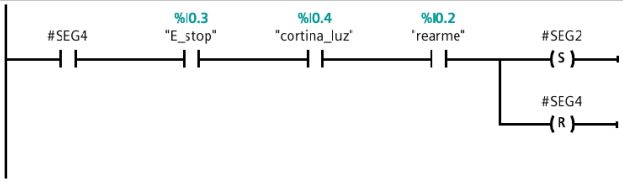
Segmento 5: SEG3 -> SEG4: se abrio la cadena (E-stop pulsado o cortina interrumpida)



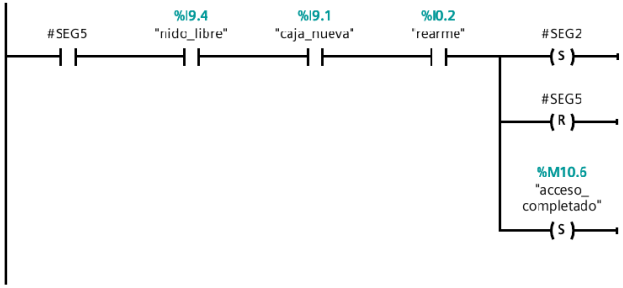
Segmento 6: SEG3 -> SEG5: pedido de acceso seguro (lo levanto CN2)



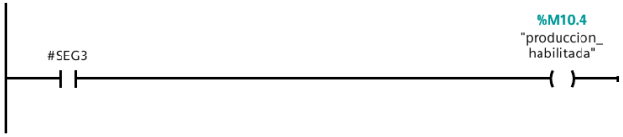
Segmento 7: SEG4 -> SEG2: causa despejada (cadena OK otra vez) y rearme



Segmento 8: SEG5 -> SEG2: nido libre, caja nueva y rearme (y se confirma el acceso)



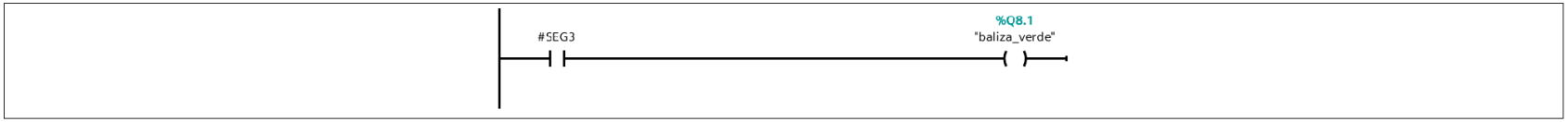
Segmento 9: Acc A — Produccion habilitada SOLO en SEG3 (bobina normal: espeja a SEG3) [SEG3]——( ) produccion_habilitada



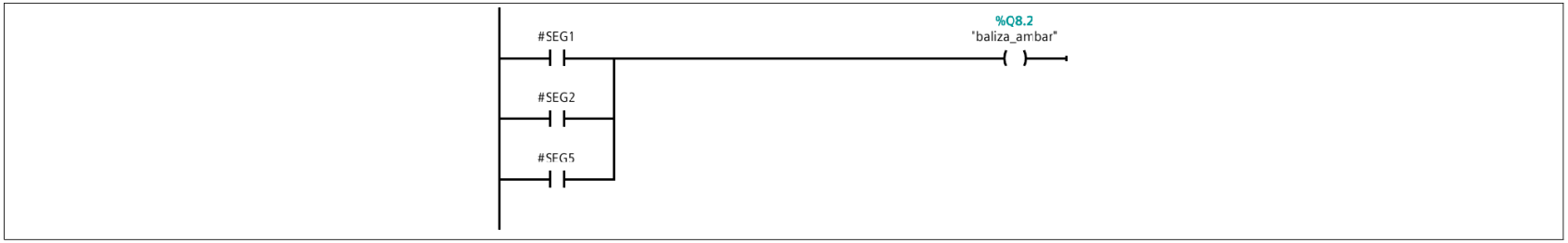
Segmento 10: Faja solo en operacion segura y con produccion habilitada



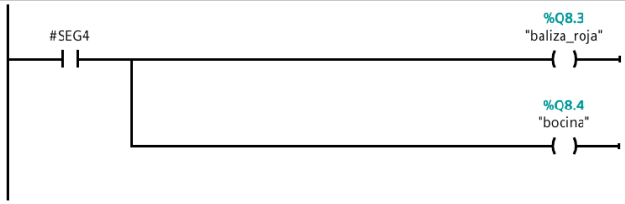
Segmento 11: Acc B — Baliza verde en operacion segura



Segmento 12: Acc C — Baliza ambar en espera/arranque/acceso (SEG1 o SEG2 o SEG5, en paralelo)



Segmento 13: Acc D — Baliza roja y bocina en parada segura

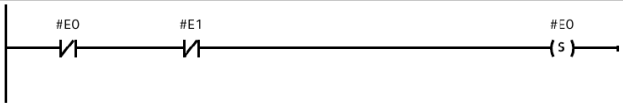

#SEG4
%Q8.3
"baliza_roja"
%Q8.4
"bocina"

FB_Setup [FB1]

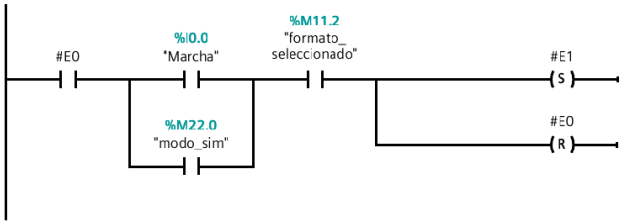
FB_Setup Propiedades							
General							
Nombre	FB_Setup	**Número**	1	**Tipo**	FB	**Idioma**	KOP
Numeración	Automático						
Información							
Título		**Autor**		**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
Input									
Output									
InOut									
Static									
E0	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
E1	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Temp									
Constant									

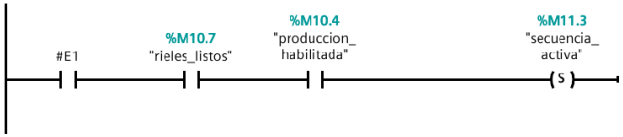
Segmento 1: Inicializacion: arrancar en E0



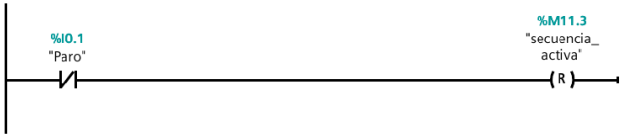
Segmento 2: E0 -> E1: hay Marcha y formato



Segmento 3: E1 -> arrancar ramas: rieles confirmados



Segmento 4: Paro normal: detiene la producción



FB_Sim [FB6]

FB_Sim Propiedades							
General							
Nombre	FB_Sim	**Número**	6	**Tipo**	FB	**Idioma**	SCL
Numeración	Automático						
Información							
Título		**Autor**		**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
Input									
Output									
InOut									
Static									
Temp									
Constant									

```
0001 // ================== SIMULACIÓN SITL — NO ES CONTROL REAL ==================
0002 // Inyecta las señales de campo (que PLCSIM no propaga por periferia).
0003 // Inerte en producción: con modo_sim = FALSE no hace nada.
0004 IF "modo_sim" THEN
0005   // Cadena de seguridad y habilitación (arranque)
0006   "Paro" := TRUE;    // NC no pulsado
0007   "E_stop" := TRUE;
0008   "cortina_luz" := TRUE;
0009   "rearme" := TRUE;
```

```
0010    "presion_ok" := TRUE;
0011    "drives_listos" := TRUE;
0012    "rieles_listos" := TRUE;
0013    "formato_seleccionado" := TRUE;
0014    "Marcha" := TRUE;
0015    // Receta
0016    "receta_actual" := 3;
0017    "cupo_robot" := 2;
0018    "cajas_pedido" := 2;
0019    "max_reintentos" := 2;
0020 END_IF;
```

Símbolo	Dirección	Tipo	Comentario
"cajas_pedido"	%MW44	Int	Número de cajas del pedido (CN3, "última caja")
"cortina_luz"	%I0.4	Bool	Cortina de luz OSSD (estado; funcion la hace el rele)
"cupo_robot"	%MW42	Int	Torres por caja que coloca el pórtico (C3)
"drives_listos"	%M21.0	Bool	STO retirado, par disponible (SEG2→SEG3).
"E_stop"	%I0.3	Bool	Seta de emergencia (estado; funcion la hace el rele)
"formato_seleccionado"	%M11.2	Bool	HMI: hay un formato elegido (E0→E1)
"Marcha"	%I0.0	Bool	Pulsador de marcha (NA)
"max_reintentos"	%MW46	Int	
"modo_sim"	%M22.0	Bool	MODO DE SIMULACIÓN PARA PLCSIM
"Paro"	%I0.1	Bool	Pulsador de paro normal (NC, a prueba de fallo)
"presion_ok"	%I9.6	Bool	Presión de soft-start alcanzada (SEG2→SEG3)
"rearme"	%I0.2	Bool	Rearme manual (ISO 13849)
"receta_actual"	%MW40	Int	Vasos por torre del formato activo (B9)
"rieles_listos"	%M10.7	Bool	Validacion HMI del ajuste manual de rieles (E1)

Anexo D — Mapa de señales de entrada y salida

Listado de las señales digitales y analógicas de entrada y salida del PLC, con su tipo y estación (Tabla D.1) y su dispositivo de origen y función (Tabla D.2).

Tabla D.1. Señales de E/S: tipo y estación.

Señal	Tipo	Estación
ENTRADAS		
Marcha / Paro / Rearme	DI	General
Selección de formato	Dato	General
Paso de vaso	DI	Inspección
Veredicto de visión (etiqueta / rebaba)	DI	Inspección
Vaso en kicker 1 / 2	DI / posición	Descarte
Vaso en fin de faja	DI	Recepción
Metering extendido / retraído	DI	Singulación
Transición vertical abajo / arriba	DI	Enfundado
Transición horizontal avanzado / atrás	DI	Enfundado
Vacío OK	DI	Enfundado
Bolsa abierta	DI	Enfundado
Vaso en bolsa	DI	Enfundado
Trampilla abierta / cerrada	DI	Enfundado
Asentamiento del Plug (posición)	Posición	Apilado
Posición del elevador (abajo, recepción)	Posición	Apilado
Caja presente / caja nueva	DI	Encajado
Cabezal cerrado	DI	Encajado
Posición de los ejes X / Y / Z	Posición	Encajado
Torre en nido / nido libre	DI	Encajado
Paro de emergencia / cortina de luz	DI de seguridad	Seguridad
SALIDAS		
Faja de acople (marcha)	DO / VFD	Recepción
Tope de metering	Válvula 5/2	Singulación
Transición vertical	Válvula 5/2	Enfundado
Transición horizontal	Válvula 5/2	Enfundado
Kicker 1 (etiqueta)	Válvula 5/2	Descarte
Kicker 2 (rebaba)	Válvula 5/2	Descarte
Vacío	DO	Enfundado
Cilindro de ventosas	Válvula 5/2	Enfundado
Trampilla (2 compuertas)	Válvula 5/2	Enfundado
Soplado Coanda	Válvula 3/2	Apilado
Plug Assist	CMMT / PROFINET	Apilado
Elevador de indexación	CMMT / PROFINET	Apilado
Cabezal (3 clamps)	Válvula 5/2	Encajado
Ejes X / Y / Z del pórtico	CMMT / PROFINET	Encajado
Ajuste de rieles de singulación	—	Singulación

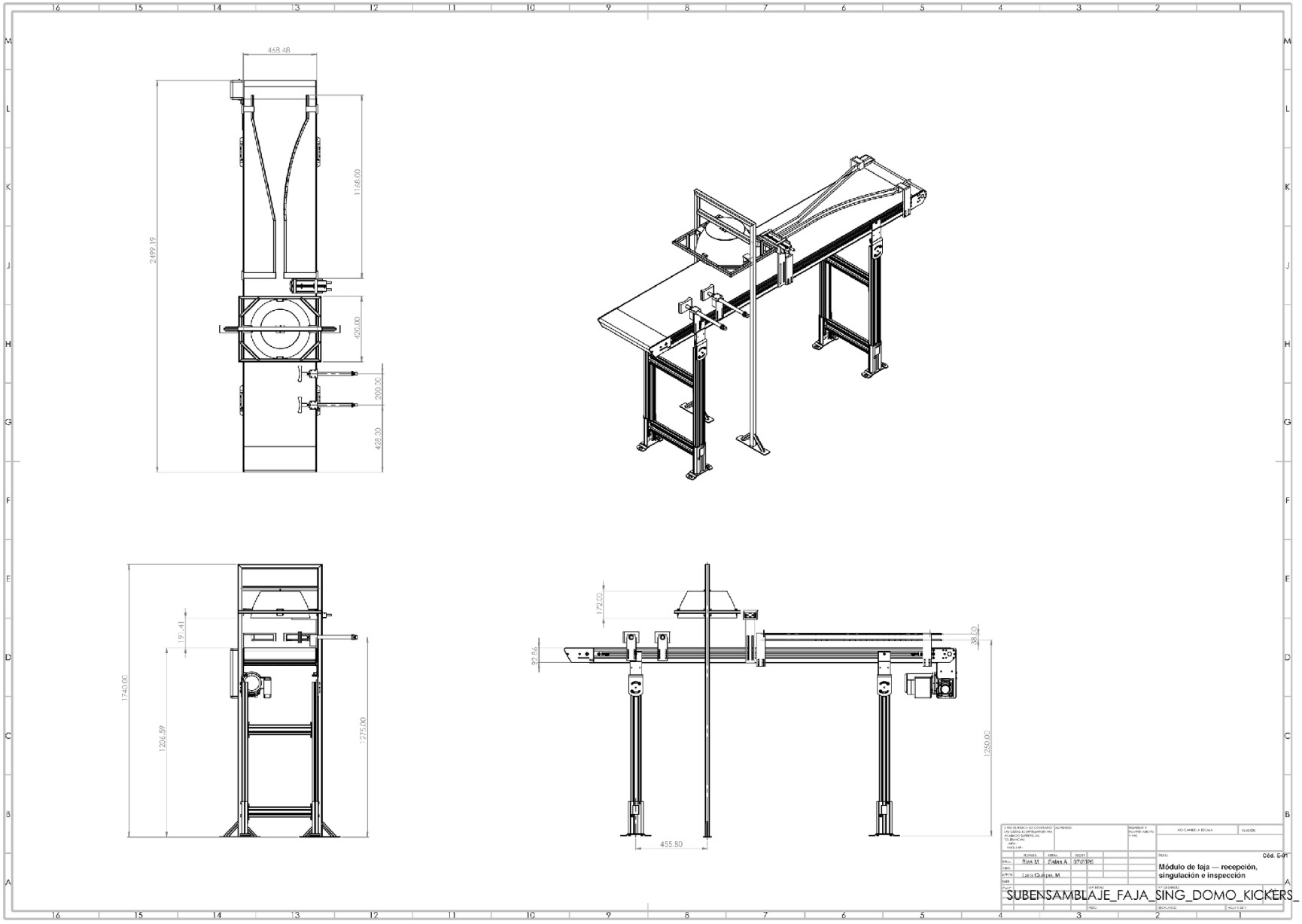
Alarmas / baliza / mensajes	DO / HMI	General
Posición del Plug (contacto, asentado, fuera del anillo, arriba)	Manual (sin salida del PLC)	Apilado

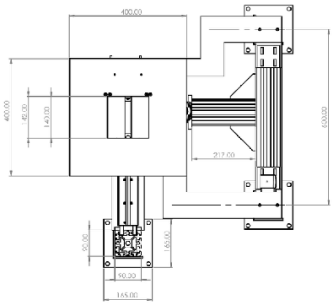
Tabla D.2. Señales de E/S: dispositivo de origen y función.

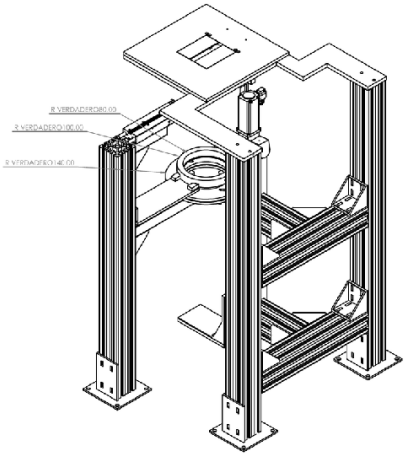
Dispositivo / origen	Función
ENTRADAS	
Pulsadores / HMI	Arranque, parada y rearme del sistema
HMI	Carga la receta del formato (12/16/20/32 OZ)
SOEG-RT-M18	Dispara la inspección por visión
PC de visión (24 V) — coautor	Conforme / falla de etiqueta / falla de rebaba
Seguimiento de faja	Posiciona el vaso frente al kicker
SOEG-RT-M18	Habilita la transición a la trampilla
Finales de carrera SMT-8M	Posición del tope de separación
SMT-8M	Posición del cilindro vertical (DFM-40)
SMT-8M	Posición del cilindro horizontal (DFM-25)
OVEL (sensor integrado)	Confirma la succión de la bolsa
SMT-8M (cilindro DFM-16)	Confirma la apertura de la bolsa
Sensor bajo la trampilla	Confirma la caída del vaso
DRVS (SRBS + SMT-8M)	Posición de las compuertas
Drive CMMT	Secuencia del asentamiento
Drive CMMT	Indexación de la torre
SOEG-RSP-M18	Habilita y reinicia el encajado
SMT-8M (ADN)	Confirma la sujeción de la torre
Encoders CMMT	Trayectoria del pórtico
Sensor del nido	Entrega de la última torre
Seta + cortina (OSSD)	Cadena de seguridad
SALIDAS	
Motorreductor Dorner	Mueve la banda
DFM-16-160	Libera los vasos de a uno
DFM-40-200	Baja/sube el conjunto de empuje
DFM-25-200	Empuja el vaso a la trampilla
DSNU-20-300	Expulsa el vaso con falla de etiqueta
DSNU-20-300	Expulsa el vaso con falla de rebaba
Eyector OVEL	Genera el vacío de las ventosas
DFM-16-150	Abre la bolsa
2× DRVS-12-180	Deja caer el vaso
Anillo Coanda	Acomoda el sobrante de la bolsa
ESBF-BS-63-800-25P	Asienta el vaso en la torre
EGC-70-600	Desciende un paso por vaso
3× ADN-16-15	Sujeta la torre por fricción
EGC-80 / EGC-70 / ESBF-63	Traslada la torre a la caja
—	Reconfiguración por formato (operario)
Torre de señalización / HMI	Señalización y avisos

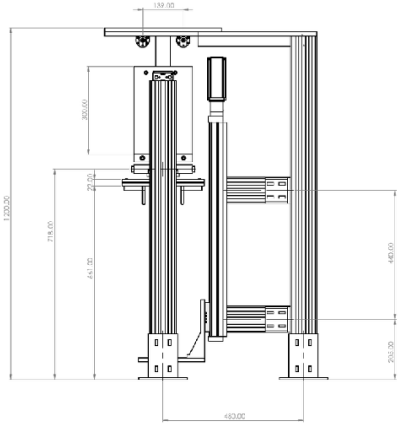
Anexo E — Planos de fabricación

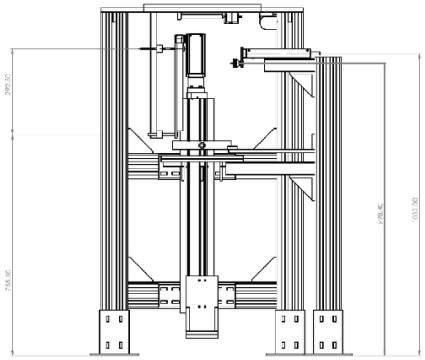
Planos de conjunto de los subconjuntos del sistema, exportados de SolidWorks 2025 en formato A3. Cada lámina incluye su cajetín con la denominación del plano, los autores, el asesor, la escala y el código (E-01 a E-04).


468.48
2499.19
1168.00
420.00
200.00
428.00
1740.00
191.41
1206.59
1275.00
172.00
92.86
38.10
1250.00
455.80
Módulo de faja — recepción, singulación e inspección
Cód. E-01
SUBENSAMBLAJE_FAJA_SING_DOMO_KICKERS_



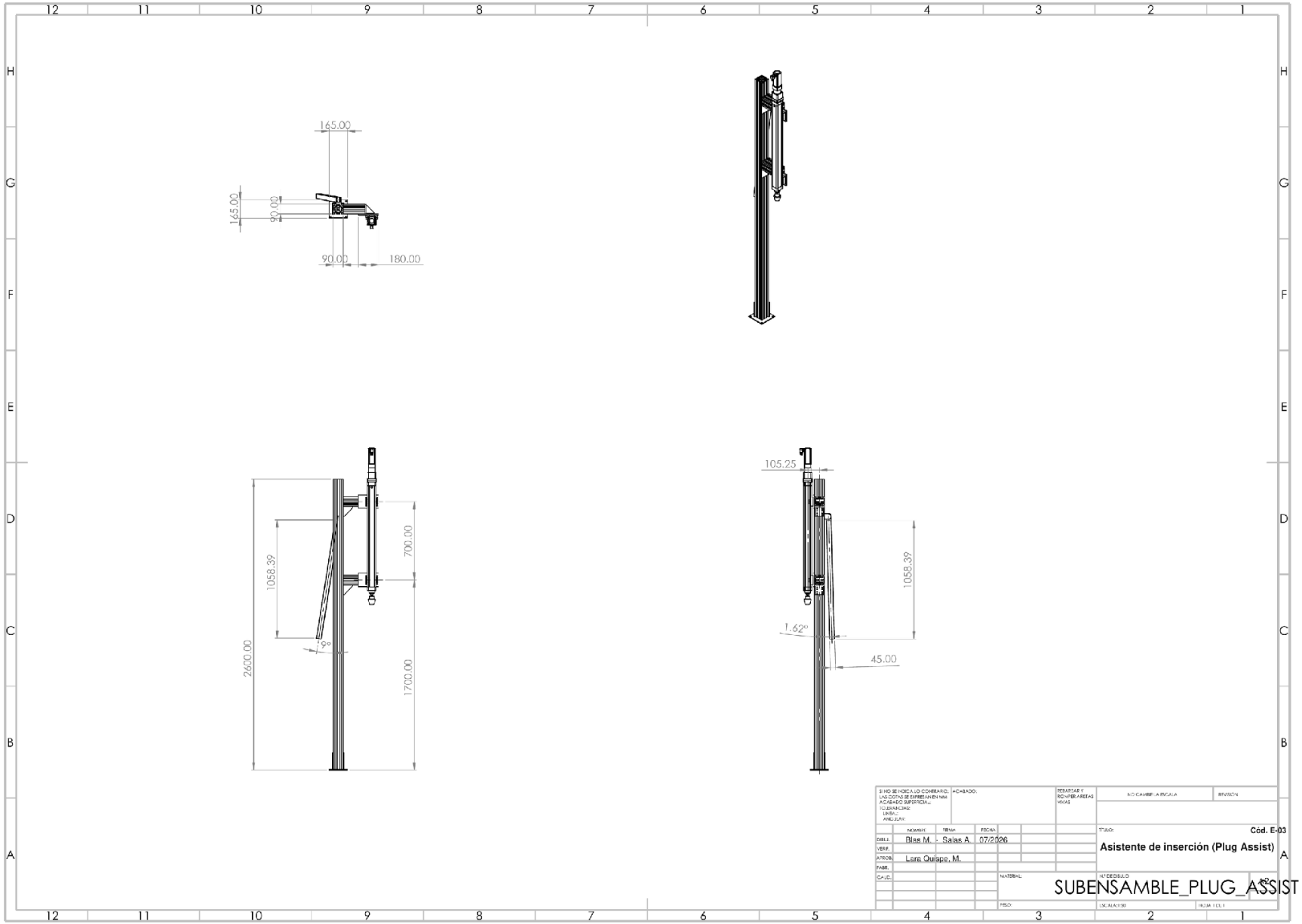


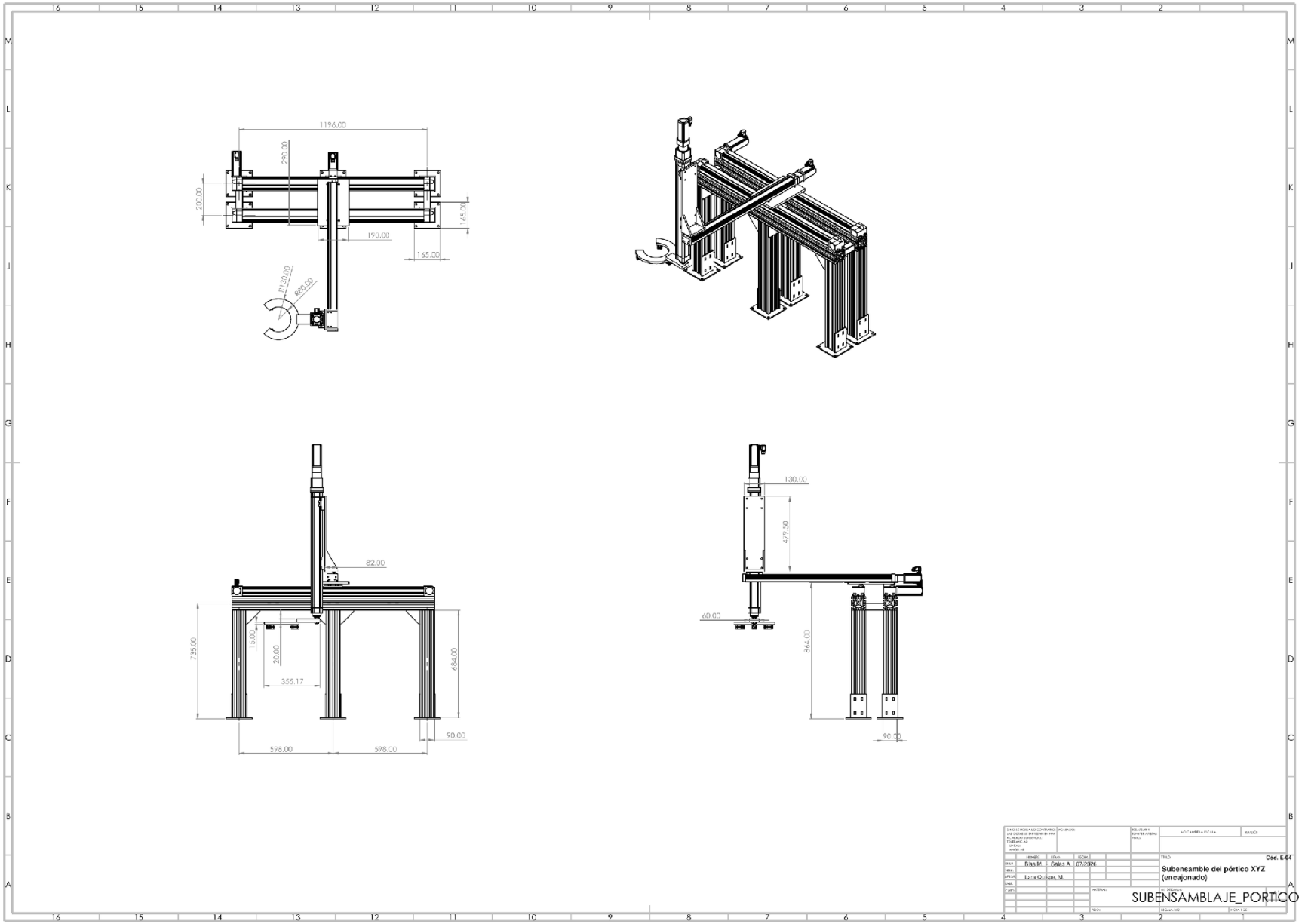




Estación de enfundado y apilado

SUBENSAMBLAJE_APILADO_ENFUN


165.00
165.00
90.00
90.00
180.00
105.25
1058.39
700.00
2600.00
1700.00
9°
1058.39
1.62°
45.00
Cód. E-03
Asistente de inserción (Plug Assist)
Blas M. - Salas A.
07/2026
Lara Quispe, M.
SUBENSAMBLE_PLUG_ASSIST


1196.00
290.00
200.00
165.00
190.00
165.00
R130.00
R80.00
82.00
735.00
15.00
20.00
355.17
684.00
90.00
598.00
598.00
130.00
479.50
60.00
864.00
90.00
Cod. E-04
Subensamble del pórtico XYZ (encajonado)
SUBENSAMBLAJE_PORTICO

Anexo F — Planos eléctricos

Esquema de cableado de entradas y salidas del PLC y distribución de 24 V CC del gabinete de control (lámina E-01, formato A3). La lámina se presenta reconstruida en una sola página.

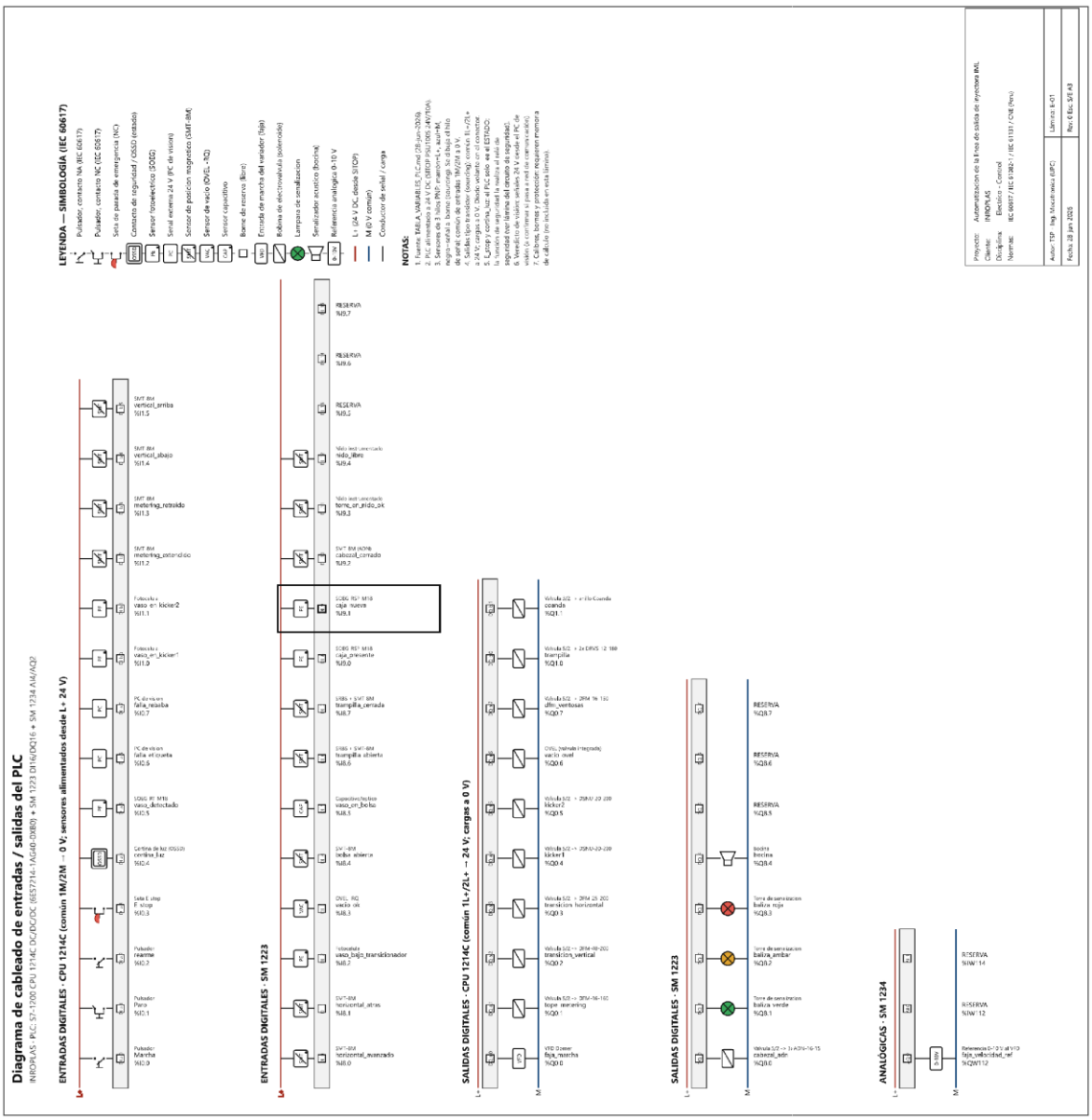


Imagen F.1. Plano eléctrico de cableado de E/S y distribución de 24 V CC (lámina E-01).

Anexo G — Supuestos y fuentes del análisis económico

El presupuesto de la Sección 3.2.1 es una estimación de orden de magnitud (clase 4 de la AACE, con una exactitud esperada de ±30 a 50 %). Al no existir cotizaciones en firme, los precios de los componentes se tomaron a nivel de catálogo y de distribuidor, y los rubros que no se cotizan por unidad se estimaron con factores porcentuales. La Tabla G.1 reúne los supuestos adoptados y su base; al final se listan las fuentes consultadas.

Tabla G.1. Supuestos del análisis económico y su base.

Supuesto	Valor adoptado	Base o fuente
Tipo de cambio	S/ 3,42 por dólar	SUNAT, cotización al 30 de junio de 2026
Remuneración Mínima Vital	S/ 1130 mensuales	Decreto Supremo 006-2024-TR, vigente en 2026
Costo laboral con cargas de ley	16,4 remuneraciones al año	Seguro de salud (9 %), gratificaciones con bonificación afecta y compensación por tiempo de servicios
Integración y puesta en marcha	30 % del valor del equipo	Práctica de integración de sistemas (30 a 50 % del costo total); ajustado a la baja por ser la ingeniería de detalle un entregable propio
Arancel de importación	0 %	Ministerio de Economía y Finanzas: los bienes de capital tributan arancel 0 %
Flete y nacionalización	10 % de lo importado	Estimación de los costos logísticos de importación
Contingencia	15 %	Rango habitual para una estimación de clase 4 (AACE)
Mantenimiento anual	4 % del valor del equipo	Estándar de 2 a 5 % del valor de reposición
Tasa de descuento	12 % anual	Costo de oportunidad del capital prudente; el MEF aplica 9 % a los proyectos públicos
Vida útil del equipo	10 años	Horizonte estándar para maquinaria industrial
Precios de los componentes	Catálogo y distribuidor	Festo y Dorner a nivel de configurador o cotización; Siemens vía distribuidores (Automation24, IndiaMart)

Fuentes consultadas (acceso: junio de 2026):

— Remuneración Mínima Vital 2026 (Decreto Supremo 006-2024-TR). Infobae: infobae.com/peru/2026/05/13/cuanto-es-el-sueldo-minimo-en-peru-2026

— Tipo de cambio SUNAT, 30 de junio de 2026. América Televisión: americatv.com.pe/noticias/actualidad

— Costo de integración de sistemas (porcentaje del costo total). AMD Machines: amdmachines.com/blog/roi-of-robotic-automation; Motion Controls Robotics: motioncontrolsrobotics.com

— Cargas sociales: aporte a EsSalud (9 %). Plataforma del Estado Peruano: gob.pe/218-seguro-regular-essalud. Compensación por tiempo de servicios: EY Perú: ey.com/es_pe/insights/workforce/cts

— Arancel 0 % para bienes de capital. Ministerio de Economía y Finanzas: mef.gob.pe (aspectos generales sobre los aranceles)

— Costo de mantenimiento (2 a 5 % del valor de reposición). UpKeep: upkeep.com/learning

— Costo de oportunidad del capital y costo promedio ponderado de capital en el Perú. MEF y UNSAAC; Ositran: ositran.gob.pe (informe sobre el WACC)

— Clasificación de estimaciones de costo (AACE, clases 1 a 5). Cenex: cenex.au/aace/estimate-classification

— Precios de referencia de componentes Siemens. Automation24: automation24.com; IndiaMart: indiamart.com

Anexo H — Validación de la lógica de control (SITL)

Capturas de la compilación sin errores, la ejecución en estado RUN y el monitoreo en línea del programa y del supervisor de seguridad en PLCSIM.

VALIDACION DE LA LOGICA DE CONTROL EN TIA PORTAL (SITL)

Sistema de fin de linea - Vasos IML - INROPLAS

Proyecto:	TSP_INROPLAS
Controlador:	SIMATIC S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC
Referencia:	6ES7 214-1AG40-0XB0 - Firmware V4.2.0
Entorno:	TIA Portal V21 - S7-PLCSIM V21
Conexion online:	PLC_1 - 192.168.0.1
Fecha:	01/07/2026

Indice de figuras

Fig. 1 FB_Seguridad [FB5] - Monitoreo online: transicion SEG2 -> SEG3
Fig. 2 Tabla de observacion - Variables de estado (monitoreo online)
Fig. 3 Online y diagnostico - CPU 1214C en estado RUN
Fig. 4 Compilacion del software - errores: 0; advertencias: 0
Fig. 5 Comparacion offline/online - objetos identicos
Fig. 6 Main [OB1] - Monitoreo online (ejecucion ciclica)

Fig. 1 - FB_Seguridad [FB5]: transicion SEG2 -> SEG3 (monitoreo online)

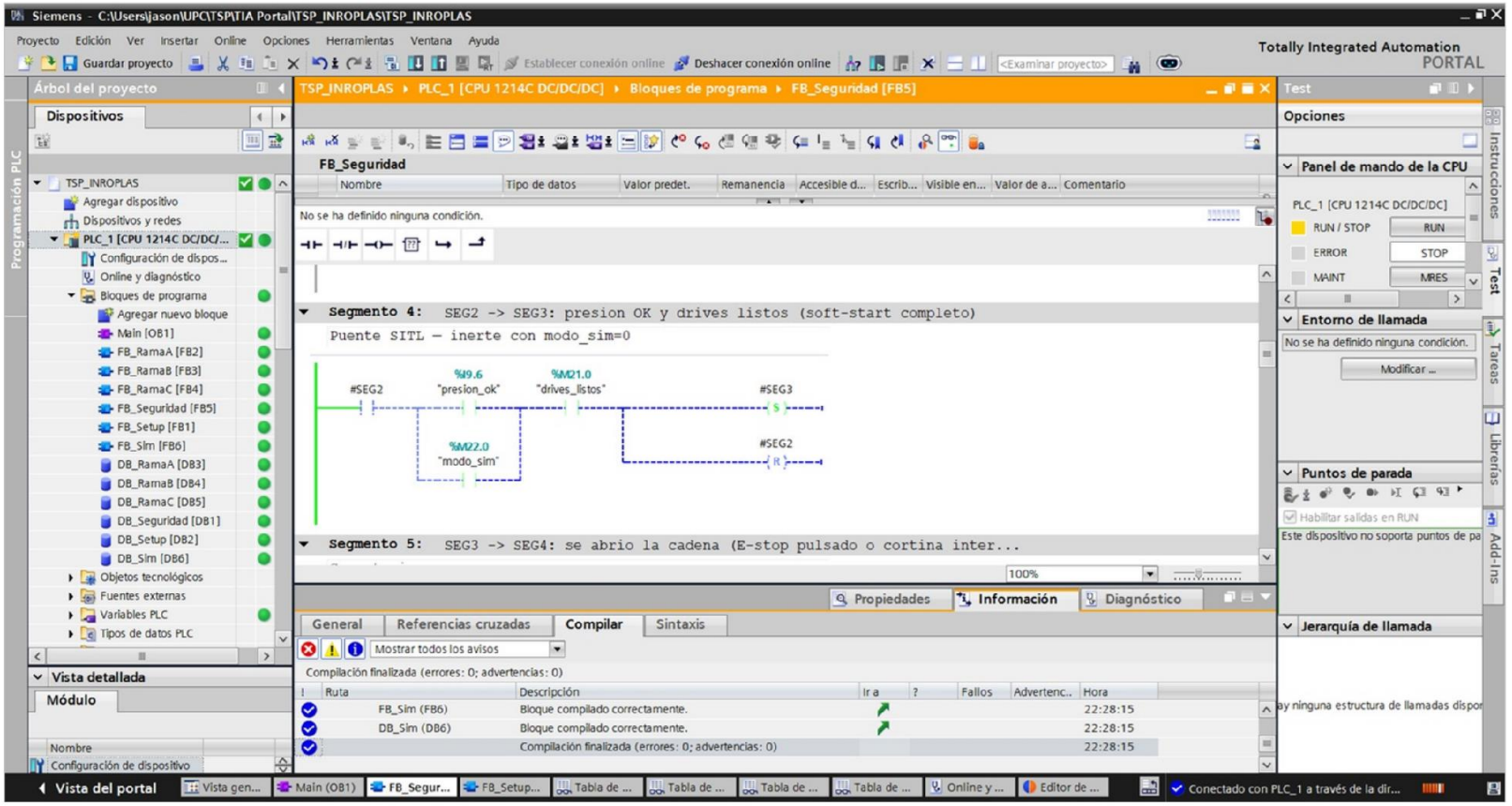


Fig. 2 - Tabla de observacion: variables de estado (monitoreo online)

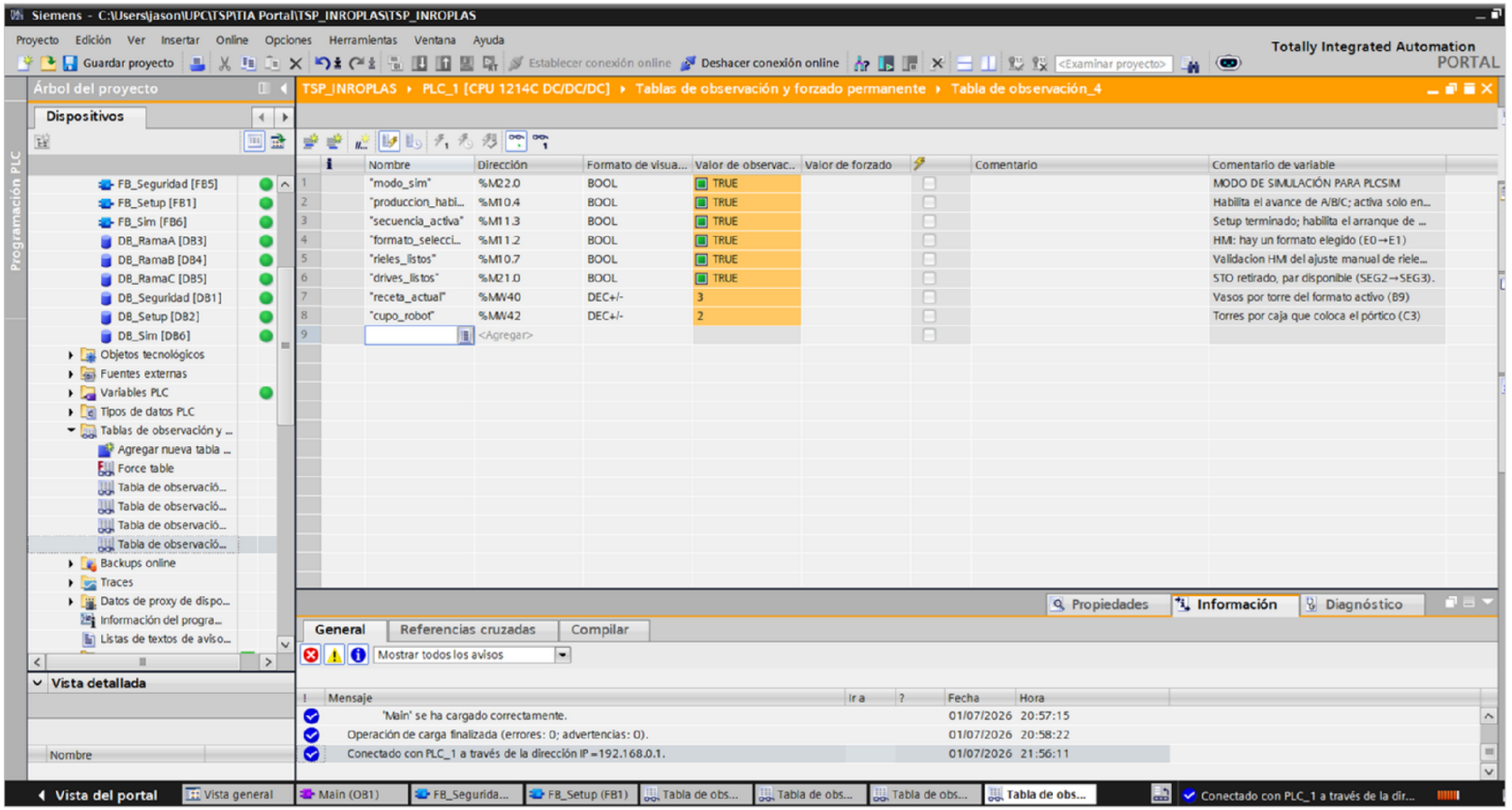


Fig. 3 - Online y diagnostico: CPU 1214C en estado RUN

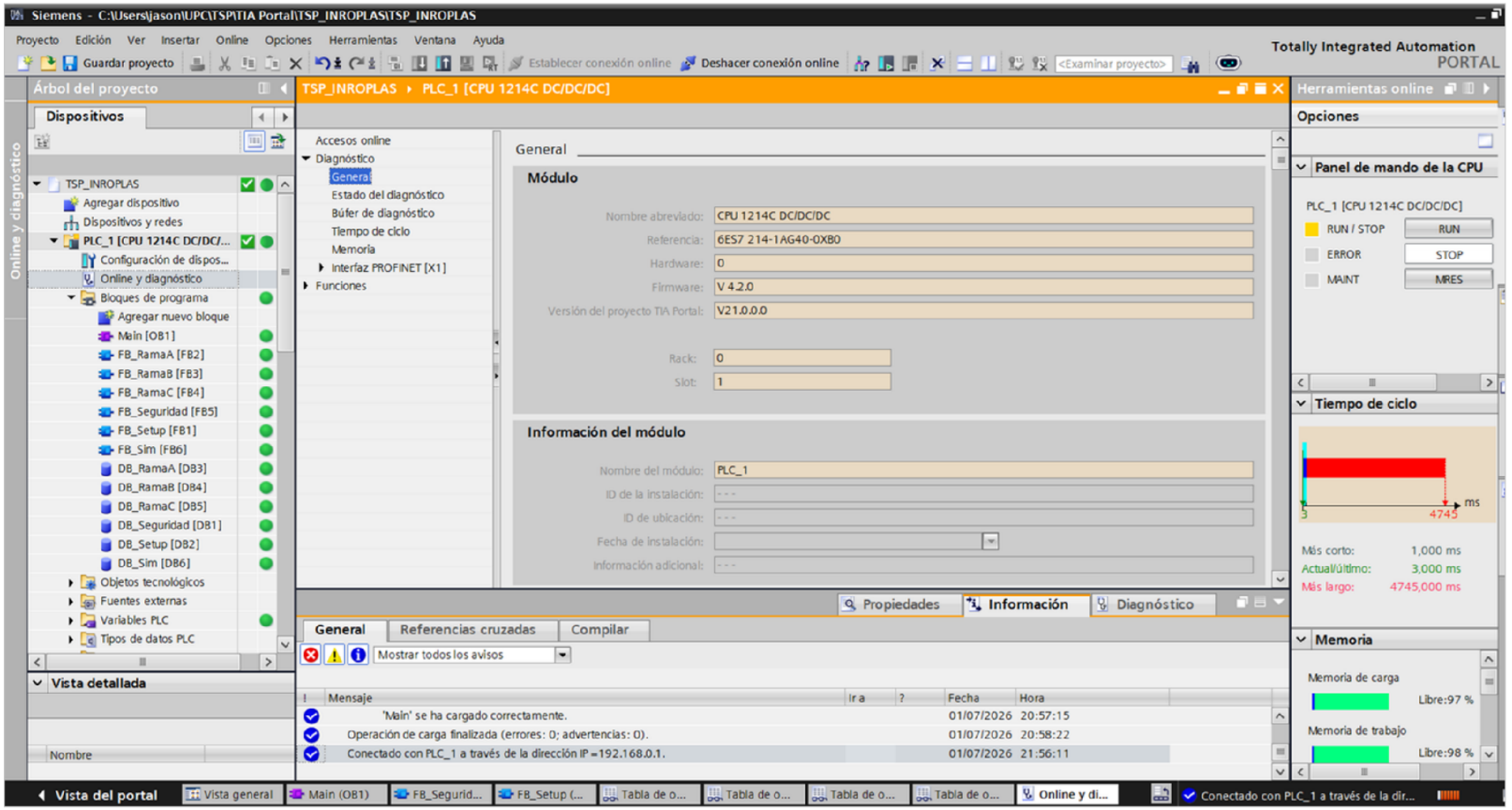


Fig. 4 - Compilacion del software: errores 0, advertencias 0

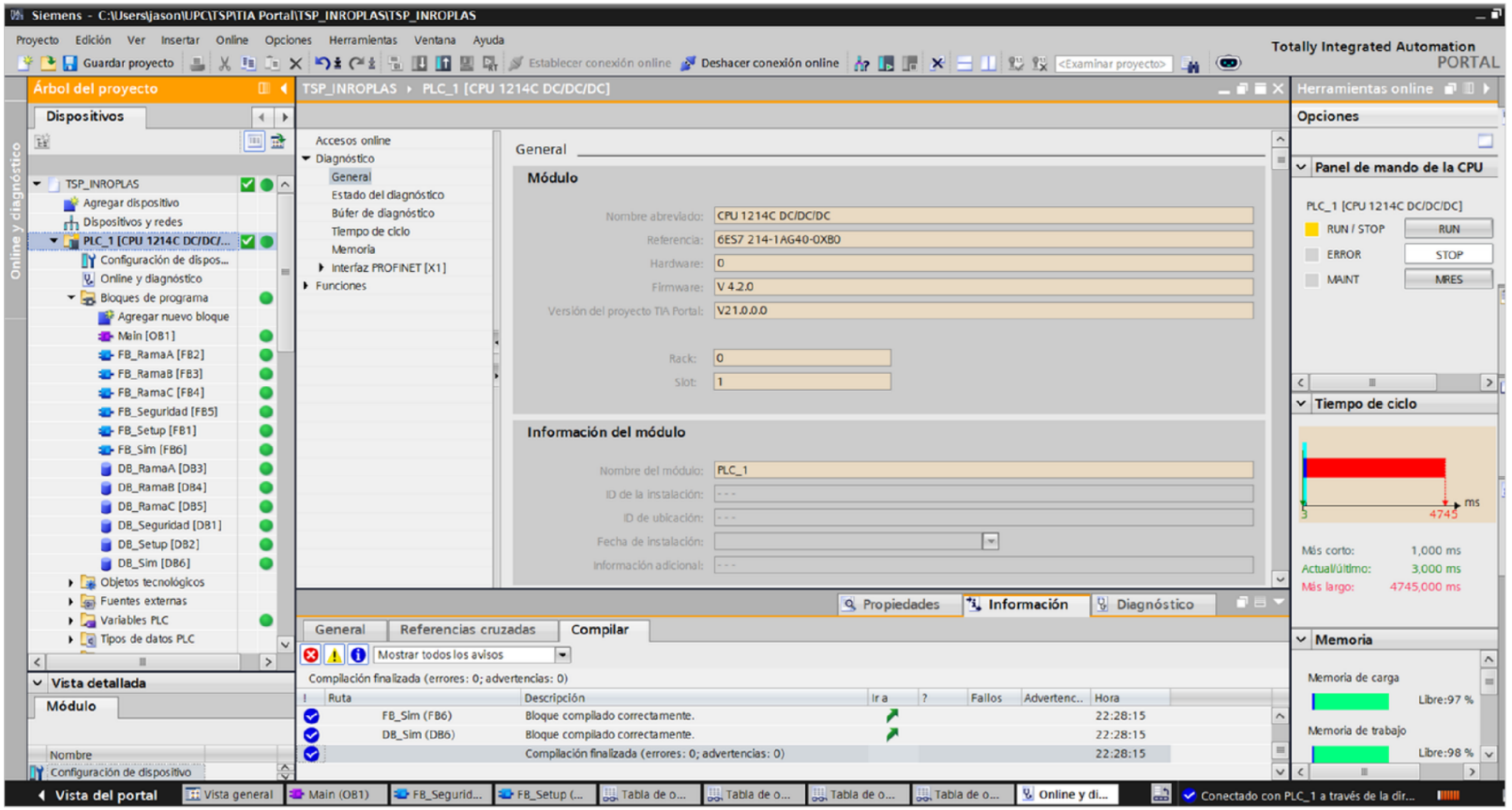


Fig. 5 - Comparacion offline/online: objetos identicos

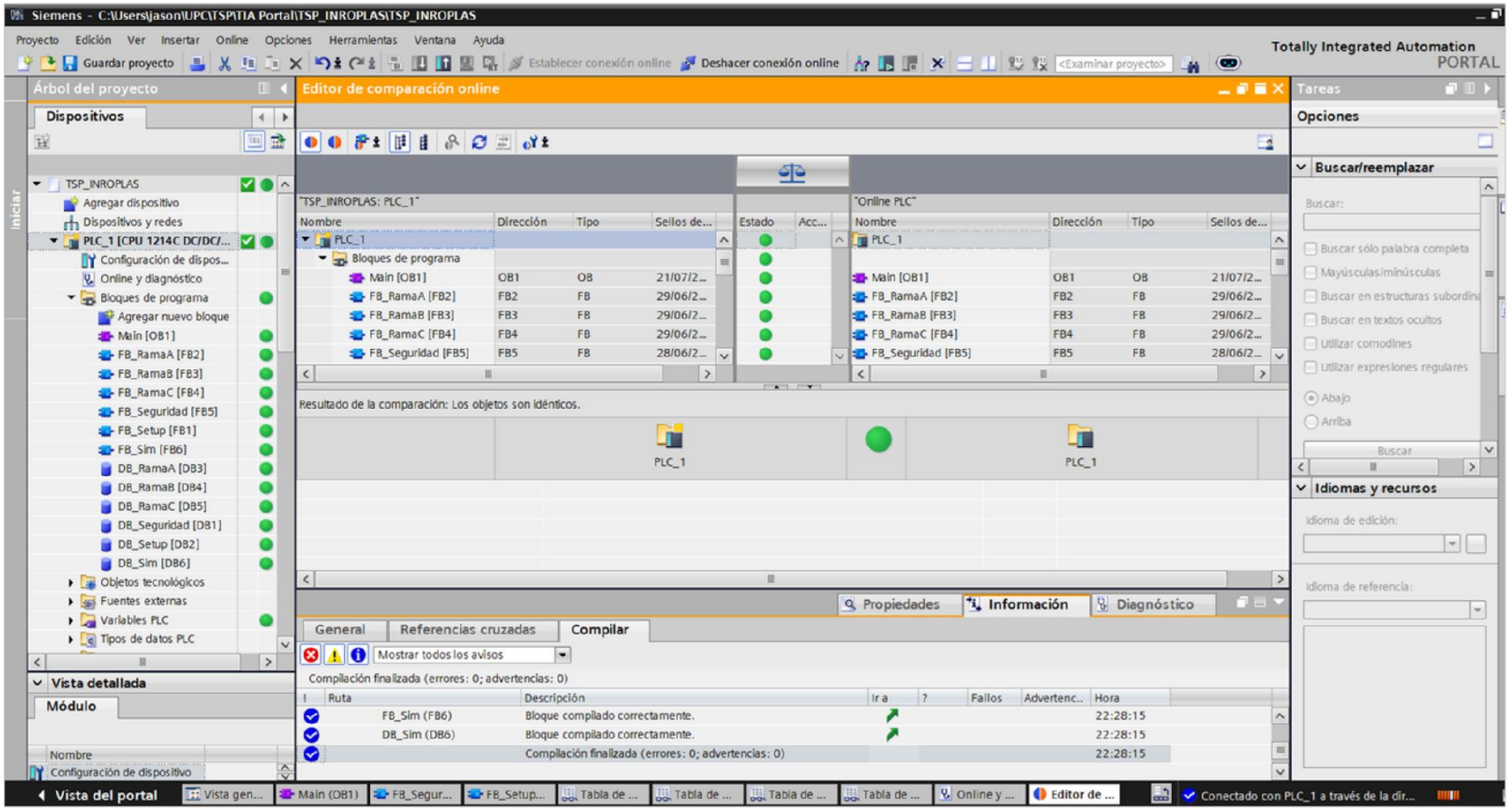
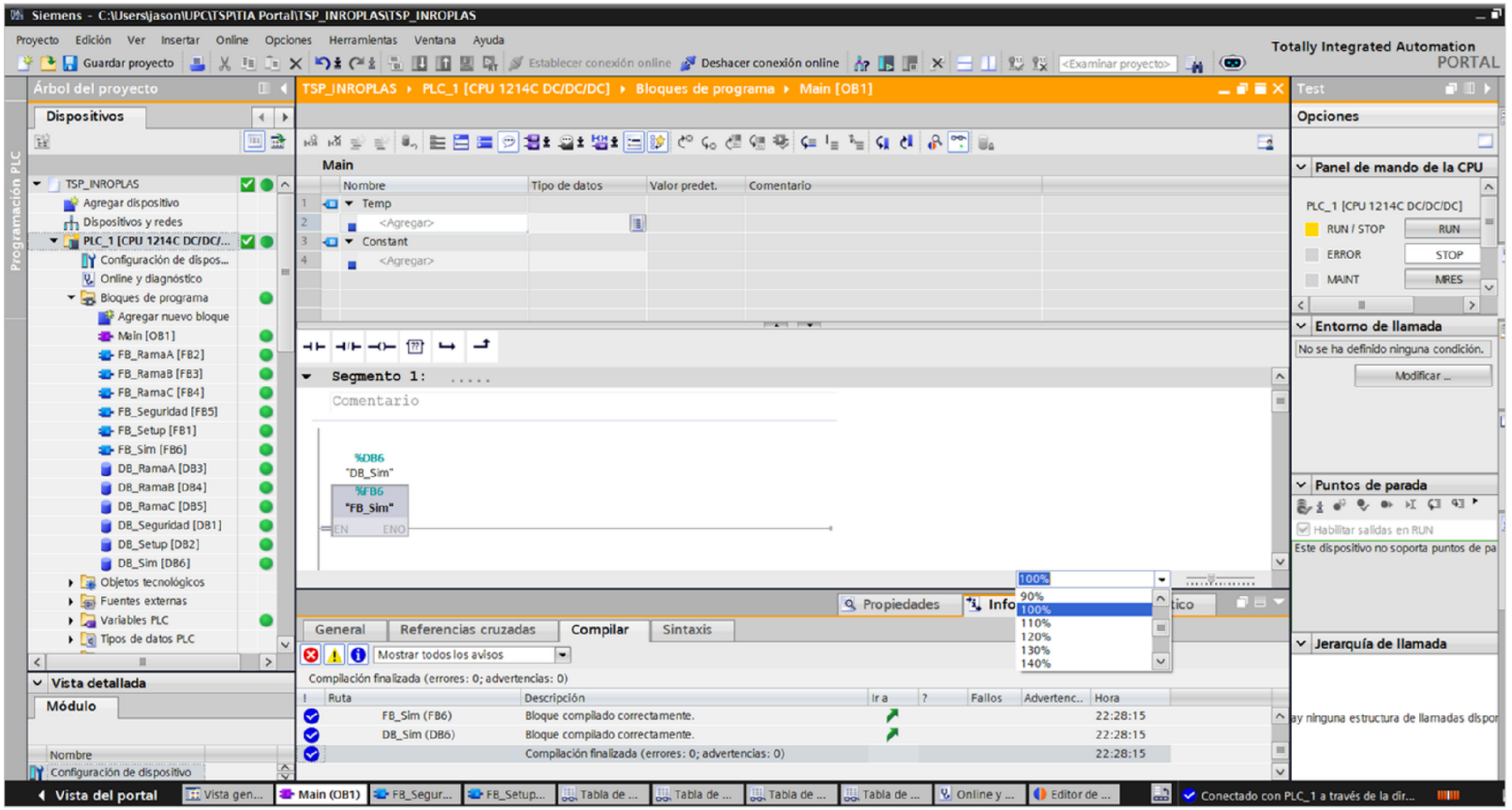


Fig. 6 - Main [OB1]: monitoreo online (ejecucion ciclica)



Anexo I — Resultados de la simulación por elementos finitos (SolidWorks 2025)

La validación estructural de las piezas críticas se realizó en SolidWorks 2025 Simulation mediante estudios estático y modal por subconjunto. En el estudio estático se comparó el esfuerzo de von Mises máximo con el límite elástico del material; en el modal se obtuvieron las frecuencias naturales para comprobar que estén por encima de la banda de excitación de la estación. Todos los estudios usaron malla sólida de elementos tetraédricos y, como caso de carga, el peor escenario: el carro del pórtico en su máxima extensión, el actuador vertical desplegado y la torre más pesada, con la gravedad aplicada y las sujeciones en las interfaces de montaje al bastidor. La Tabla I.1 resume los parámetros y resultados principales de cada estudio; sustituye a los informes completos de SolidWorks por sus datos esenciales.

Tabla I.1. Resumen de los estudios por elementos finitos (estático y modal).

Subconjunto	Estudio	Material (límite elástico)	σ von Mises máx (MPa)	Despl. máx (mm)	1ª frecuencia f_1 (Hz)
Pórtico (eje X)	Estático y modal	Al 6063-T6 / 6061-T6	0,66	0,005	103,0
Cabezal	Modal	Al 6061-T6	—	—	30,9
Mástil del asistente de inserción	Estático y modal	Al 6063-T6 / 6061-T6	0,39	0,073	8,02
Apilado: torres, trampilla y elevador	Estático y modal	Al 6063-T6 / 6061-T6	11,6	2,80	24,7
Apilado: poste de ventosas, Coanda y jaula	Estático	Al 6061-T6 / 6061-O	4,6	0,106	—

Límites elásticos de los materiales: aluminio 6063-T6 = 215 MPa; 6061-T6 = 275 MPa; 6061-O = 62 MPa (módulo elástico 69 GPa en los tres).

Síntesis de resultados. Los esfuerzos de von Mises se mantienen muy por debajo del límite elástico en todos los subconjuntos: el factor de seguridad mínimo obtenido es de aproximadamente 18, frente al criterio de aceptación de FS ≥ 2. En el estudio modal, la primera frecuencia natural más baja del sistema es de 8,02 Hz (mástil del asistente de inserción), 1,6 veces por encima de la cota superior de la banda de excitación de la estación, cumpliendo el criterio $f_1 \geq 1{,}5\times$. Ambos resultados confirman que las piezas

críticas no presentan deformación permanente ni riesgo de resonancia bajo el caso de carga más desfavorable.